

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

им. Г.И. Будкера СО РАН

В.Ф. Гурко, А.Н. Журавлев, П.В. Зубарев,  
А.Н. Квашнин, В.А. Киселев, О.И. Мешков,  
Н.Ю. Мучной, А.Д. Хильченко

МНОГОАНОДНЫЙ ФЭУ  
ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ  
ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА  
НА КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-4М

ИЯФ 2004-81

Новосибирск  
2004

**Многоанодный ФЭУ  
для оптической диагностики пучка  
на коллайдере ВЭПП-4М**

В.Ф. Гурко, А.Н. Журавлев, П.В. Зубарев,  
А.Н. Квашинин, В.А. Киселев, О.И. Мешков,  
Н.Ю. Мучной, А.Д. Хильченко  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
630090, Новосибирск, Россия

**Аннотация**

Для исследования быстрых изменений поперечного профиля пучка на ускорителе ВЭПП-4М разработан прибор, основанный на 16-ти анодном ФЭУ R5900U-00-L16 HAMAMATSU. Устройство позволяет регистрировать  $2^{17}$  профилей пучка с однооборотным временным разрешением и может быть использовано как в экспериментах по физике ускорителей, так и для рутинных измерений параметров коллайдера.

**VEPP-4M optical beam profile monitor  
with one-turn temporal resolution**

O.I. Meshkov, V.F. Gurko, A.N. Zhuravlev, P.V. Zubarev,  
V.A. Kiselev, N.Yu. Muchnoi, A.N. Selivanov,  
V.V. Smaluk, A.D. Khilchenko  
Budker Institute of Nuclear Physics  
630090, Novosibirsk, Russia

**Abstract**

The transverse beam profile monitor based on the Hamamatsu multi-anode photomultiplier tube (MAPMT) with 16 anode strips is used at VEPP-4M collider. The monitor is applied for studying of turn-to-turn dynamics of the transverse beam profile during  $2^{17}$  turns. The device enables to provide a permanent measurement of synchrotron and betatron frequencies as well.

## Введение

В физике ускорителей всегда имелся интерес к изучению распределения частиц в пучке при исследовании «быстрых» неустойчивостей типа эффектов встреч. Для этого необходимо обеспечить поворотное измерение динамики профиля пучка на протяжении десятков, а то и сотен тысяч оборотов. Нами сделана попытка создать прибор, способный удовлетворить этим требованиям.

### 1. Многоанодный ФЭУ (МАРМТ)

На рис.1 показана оптическая схема измерений параметров пучка  $e^-$  на ускорителе ВЭПП-4М [2,3].

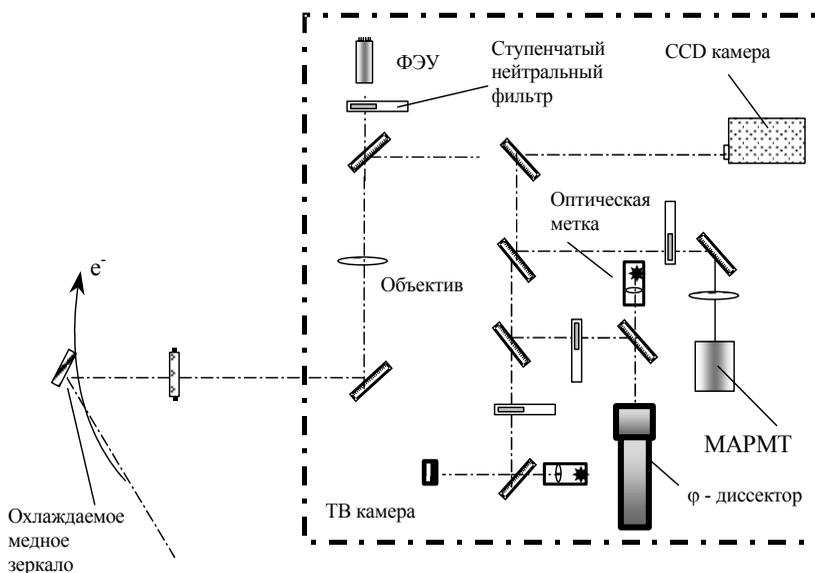


Рис. 1. Оптическая схема диагностики.

Видимая часть спектра синхротронного излучения отражается от охлаждаемого зеркала и выводится из вакуумной камеры через кварцевое окно. Затем, изображение пучка формируется на приемниках сигнала (ТВ-камера, ПЗС-камера, многоанодный ФЭУ,  $\phi$ -диссектор) посредством зеркал и объективов.

Многоанодный ФЭУ (МАРМТ) работает на ВЭПП-4М на электронном направлении. Данное устройство основано на 16-анодном ФЭУ японской фирмы НАМАМАТСУ. Внешний вид ФЭУ показан на рис.2, а основные параметры приведены в таблице 1.

Кроме ФЭУ, в состав прибора также входят 12-разрядный АЦП, модуль управления, внутреннее ЗУ объемом 4 Мбайт, позволяющее записывать  $2^{17}$  (131 072) профилей пучка. При желании можно менять шаг записи в пределах 1,2,4, ... 128 оборотов. Тем самым время наблюдения за пучком

Таблица 1

<b>Основные технические характеристики ФЭУ R5900U-00-L16 НАМАМАТСУ</b>		
Спектральная чувствительность		300 ÷ 650 нм
Длина волны максимальной чувствительности		450 нм
Время нарастания сигнала на аноде		0,6 нс
Темновой ток на аноде Тур. (max)		0,2 (2) нА
Размер ФЭУ		30мм x 30мм
Фотокатод	Материал	Бишелочной
	Минимальная рабочая поверхность канала	0,8 x 16 мм <sup>2</sup>
Число каналов		16
Ширина канала		1мм
Материал окна		боросиликатное стекло
Диод	Тип	Металло-канальный
	Число каскадов усиления	10
Напряжение питания между анодом и катодом		600 ÷ 900 В (dc)
Средний ток анода в канале		0,01мА
Максимальный импульсный ток		0,5 мА
Согласованность анодов		1 : 0,7

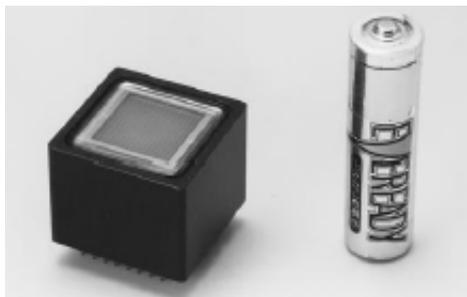


Рис. 2. Внешний вид ФЭУ R5900U-00-L16 HAMAMATSU.

может быть увеличено с 160 мс ( $2^{17}$  оборотов) до 20 сек ( $128 \times 2^{17}$  оборотов). Это позволяет анализировать частоты колебаний пучка в пределах от нескольких Гц до сотен КГц. Основные параметры прибора приведены в таблице 2.

Оптическая схема, формирующая на фотокатоде MAPMT изображение пучка, позволяет менять увеличение в пределах от 6 до 20 раз, в зависимости от потребностей эксперимента.

Таблица 2

Размеры устройства		250 x 100 x 100 мм
Интерфейс		100M ethernet (витая пара)
Объем внутренней памяти		~4 М ( $2^{17}$ профилей пучка в 16 точках)
Временной интервал записи		160мс ÷ 20 сек
Дискретность записи		Через $1 \div 2^8$ оборотов
Анализируемый диапазон частот колебаний пучка		Несколько Гц ÷ сотни КГц
Частота синхронизации		До 1МГц
Напряжение импульсов	Синхронизации	3 ÷ 5 В
	Запуска	~20 В

На рис.3. схематично показано устройство и расположение анодов ФЭУ относительно пучка. На рисунке ФЭУ расположен для измерения горизонтального распределения плотности частиц в пучке. Для измерения вертикального распределения ФЭУ должен быть развернут на угол  $90^\circ$ .

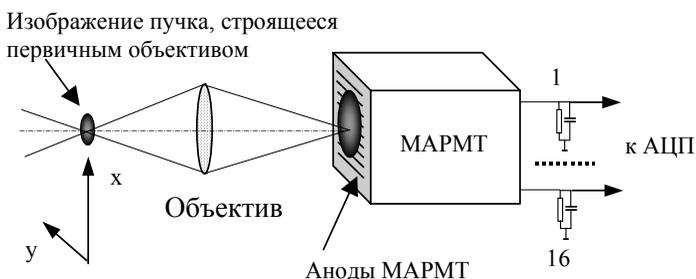


Рис.3. Оптическая схема и расположение анодов ФЭУ относительно пучка.

### 1.1. Принцип работы

Схема работает следующим образом: после подачи импульса запуска, зарегистрированные сигналы с ФЭУ оцифровываются АЦП, затем передаются и хранятся в ЗУ, после чего по запросу оператора информация считывается в компьютер. Тактирование АЦП осуществляется от нулевой сепаратрисы с регулируемой задержкой. Внешний запуск осуществляется в выбранный оператором момент времени, а также может быть привязан к любому из интересующих процессов: «удар» по пучку, сведение/разведение пучков, перепуск пучка и т.д.

На рис. 4. изображена электронная схема прибора. Многоанодный ФЭУ обозначен на ней как источник тока, генерирующий импульсы с частотой оборотов пучка. Передний фронт такого импульса (рис.5.) определяется временным разрешением ФЭУ и предусилителя и составляет  $\sim 10$  нс. Спад импульса зависит от постоянной времени RC-цепочки,  $\tau_{RC} \sim 200$  нс ( $R = 13$  кОм,  $C = 15$  пФ).

Рабочая точка на сигнале, в которой производится измерение амплитуды, определяется задержкой сигнала относительно тактирующего импульса АЦП. Она выбирается исходя из следующих простых соображений: с одной стороны, желательно увеличить амплитуду сигнала для наиболее эффективного использования разрядов АЦП и увеличения точности измерений; с другой стороны необходимо обеспечить хорошую повторяемость сигнала от оборота к обороту, чего можно добиться на более пологом участке кривой.

На практике этот выбор осуществляется экспериментально, измерением величины *сигнал/шум* для разных задержек тактирующего импульса.

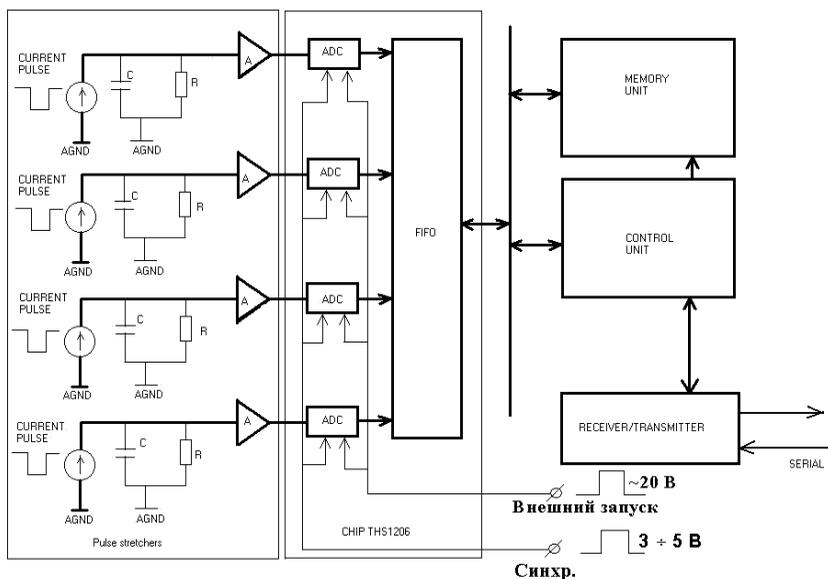


Рис. 4. Электрическая схема регистратора.

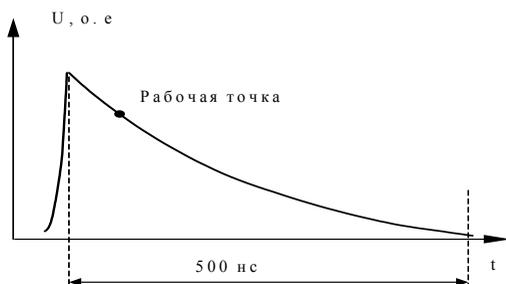


Рис. 5. Сигнал с одного из анодов МАРМТ, регистрируемый АЦП.

## 1.2. Измерение относительной чувствительности анодов

Согласно паспортным данным МАРМТ, чувствительность анодов может отличаться на величину до 30%. Для проверки этого факта и последующего учета этой особенности были проведены измерения относительной чувствительности анодов ФЭУ, при этом были учтены отличия между нулевыми уровнями АЦП на разных каналах. При этих измерениях фотокатод МАРМТ однородно засвечивался рассеянным светом, после чего сигналы с анодов, усредненные по  $2^{17}$  оборотов пучка, сравнивались между собой при различных значениях высокого напряжения (рис.6).

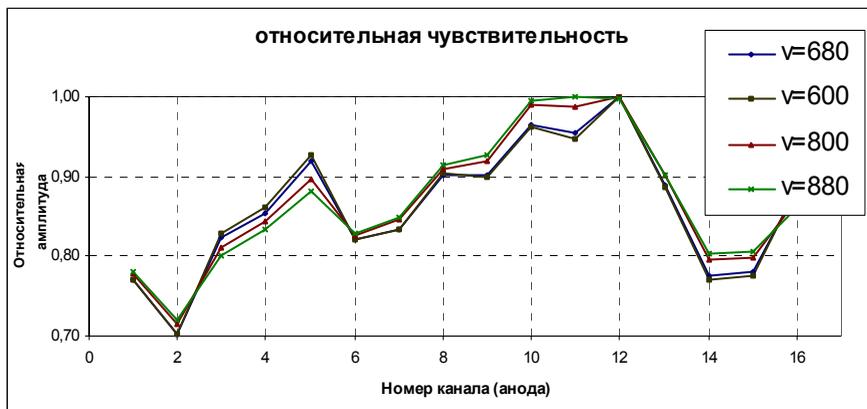


Рис. 6. Относительная чувствительность анодов ФЭУ.

Расхождения между чувствительностями анодов оказалось в пределах ожидаемых паспортных величин (1:0,7). Относительная калибровка учитывалась в дальнейших экспериментах.

## 2. Возможности прибора и программ анализа

Для управления прибором была написана программа на языке C++, с использованием пакета обработки данных ROOT [4].

Прибор и программы анализа позволяют:

1. Управлять параметрами ФЭУ, такими как: напряжение питания (600 – 900 В), частота дискретизации запуска от  $f_0$  до  $f_0/128$  (т.е. имеется возможность считывать сигнал не на каждом обороте, а например, на каждом 128-м).
2. Наблюдать эволюции поперечного профиля пучка во времени на любом интервале от 1 до 131072 оборота (рис.7).
3. Наблюдать и анализировать любую проекцию получившегося распределения сигнала, как по времени, так и по любому каналу (рис.8).
4. Выделить характерные частоты колебаний пучка с помощью Фурье-преобразования сигналов из отдельного канала ФЭУ либо из вычисленного поведения центра тяжести пучка. Вычисление положения центра тяжести пучка осуществляется путем аппроксимации зарегистрированных профилей гауссианом. При этом на каждом обороте определяется как положение максимума гауссиана, так и дисперсия.

На рис.9. представлен результат преобразования Фурье. Можно видеть синхротронную частоту  $\nu_s$ , а также частоты бетатронных колебаний пучка по горизонтали и вертикали  $\nu_x$ ,  $\nu_z$ .

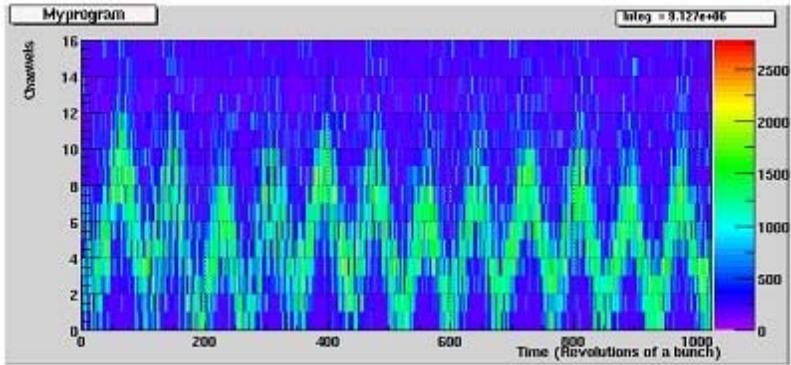


Рис. 7. Эволюция пучка во времени в присутствии фазовых колебаний. По вертикальной оси – номер канала (анода), по горизонтальной – время, в единицах оборотов пучка. Амплитуда сигнала в цветовой шкале.

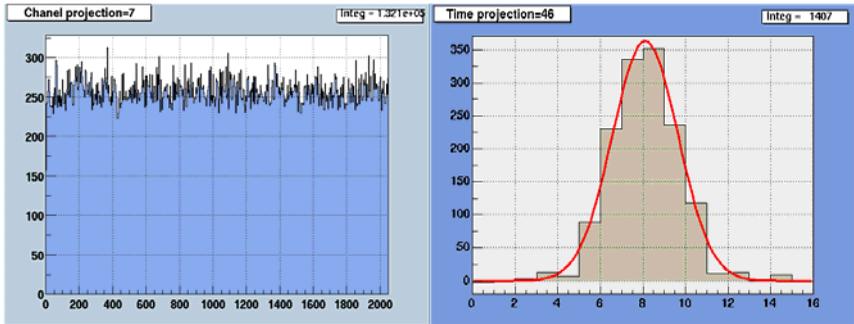


Рис. 8. Проекция распределения. Справа: профиль пучка на 46-м обороте от момента запуска АЦП. Размер одного канала 0.2 мм. Слева: пооборотный сигнал в 7 канале.

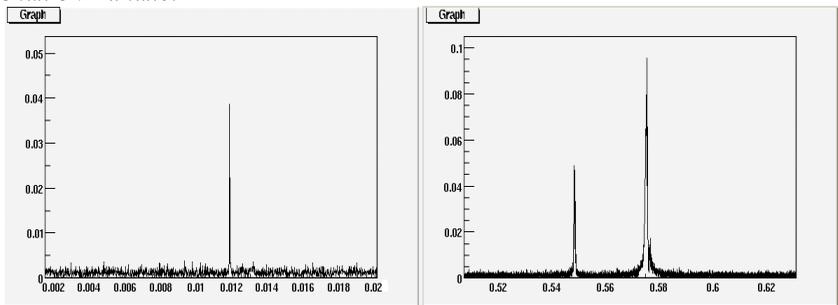


Рис. 9. Частоты колебаний пучка на комплексе ВЭПП-4М.

$$v_s = 0.0115, v_x = 0.547, v_y = 0.578.$$

Увеличив время наблюдения за пучком до нескольких секунд, можно выделить низкочастотный спектр колебаний пучка (рис.10).

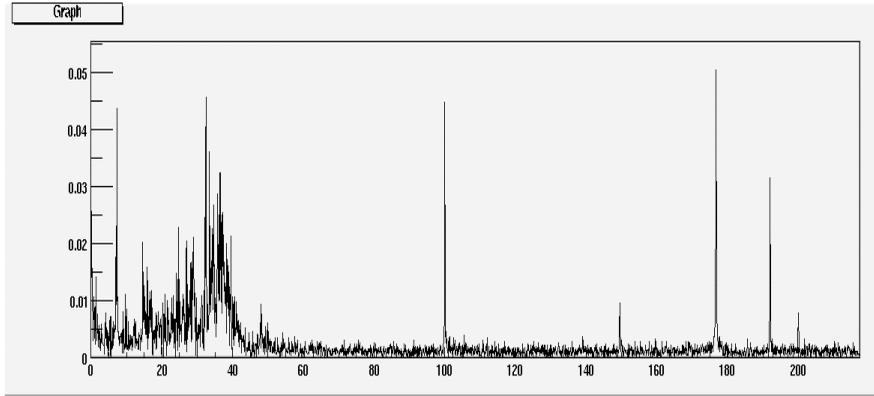


Рис.10. Низкочастотный спектр колебаний пучка.

### 3. Экспериментальные результаты

#### 3.1. Удар кикером

Один из примеров работы прибора – это анализ поведения пучка при ударе кикером. На отклоняющие пластины в вакуумной камере ускорителя подавался импульс напряжения 500 В (рис.11,12). Измерения проводились при различных токах пучка и параметрах ускорителя, вертикальный размер  $\sigma_y \approx 0.2$  мм, хроматизм  $C_z \approx 3.5$ .

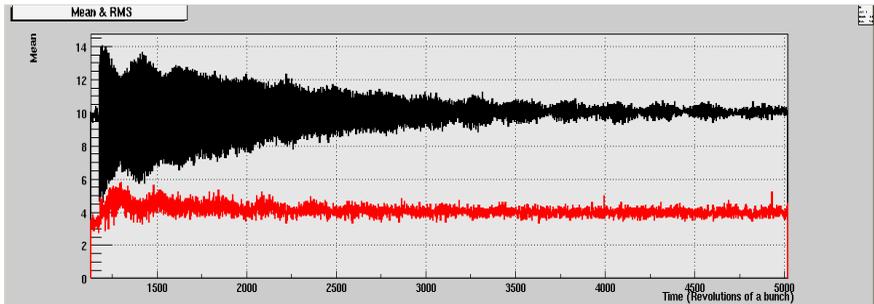


Рис. 11. Дипольные колебания пучка (верхний график) и поведение вертикального размера  $\sigma_y$  после удара,  $I_e = 3$  мА. Спад дипольных колебаний обусловлен быстрым затуханием. Размер одного канала 0.12 мм.

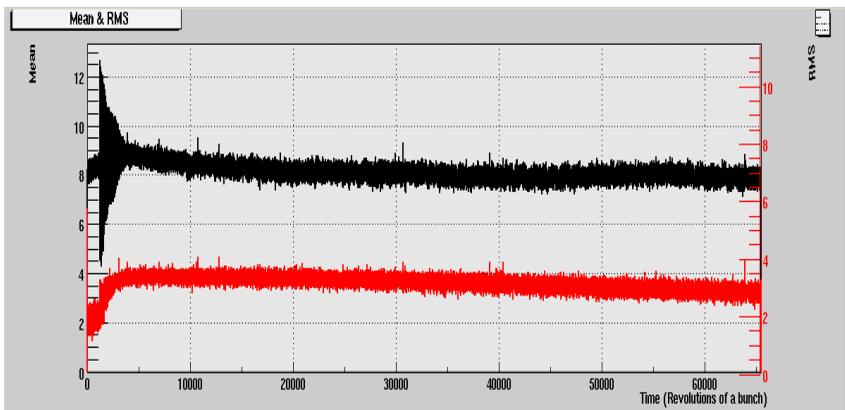


Рис. 12. Колебания центра тяжести пучка и изменение вертикального размера  $\sigma_y$  после удара кикером. Ток пучка  $I_e = 110 \mu\text{A}$ . Раскогеренчивание происходит за счет кубической нелинейности  $\frac{dv}{da^2} = -8.5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-2}$ . Хроматизм  $C_z \approx -1$ . Хорошо заметно уменьшение  $\sigma_y$  за счет радиационного затухания.

Удар произошел в с задержкой около 1200 оборотов пучка относительно запуска ФЭУ, верхние кривые на каждом графике показывают колебания центра тяжести пучка, а нижние – поведение размеров пучка. Видно, что колебания затухают примерно за 5000 оборотов. Заметно, что при увеличении размера пучка уменьшается амплитуда колебаний, и наоборот.

Измерения, показанные на рис.12, производились при токе пучка  $I_e = 120 \mu\text{A}$ , для того, чтобы уменьшить влияние коллективных эффектов. После удара кикером за время около 3000 оборотов происходит затухание дипольных колебаний, сопровождающееся увеличением вертикального размера пучка. Столь быстрое раскогеренчивание колебаний связано с большой величиной кубической нелинейности  $\frac{dv}{da^2} = -8.5 \cdot 10^{-2}$ . Анализ поведения вертикального размера  $\sigma_y$  позволяет определить время радиационного затухания, хотя в этих экспериментах нас интересовали чисто качественные особенности поведения пучка.

На рис.13 можно увидеть, как небольшой по амплитуде удар вызывает раздувание пучка, связанное с развитием неустойчивости квадрупольной моды. При этом ток пучка в ВЭПП-4М был близок к пороговому значению по ТМС на энергии  $E = 1870 \text{ МэВ}$  с выключенной «змейкой»:  $I_e = 5.4 \text{ mA}$ .

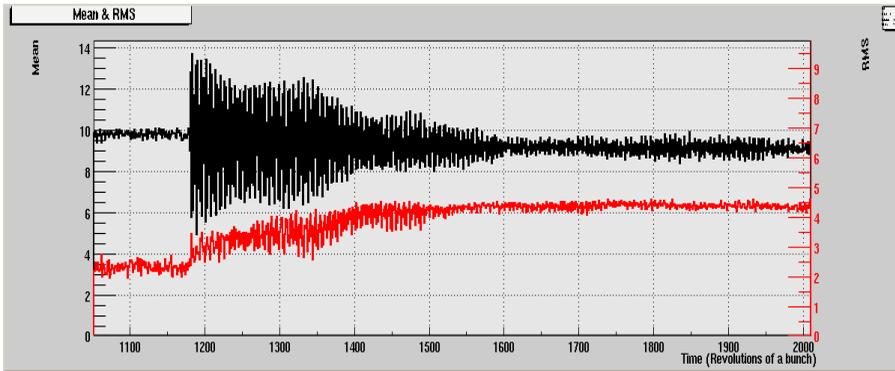


Рис. 13. Дипольные колебания пучка (верхний график) и поведение вертикального размера  $\sigma_y$  после удара,  $I_e = 5.4$  мА. После небольшого удара происходит частичный сброс тока и развивается неустойчивость квадрупольной моды.

Сравнение этих результатов с измерениями пикапов показывает хорошее совпадение результатов обеих диагностик. Пикап, однако, дает информацию только о положении центра тяжести пучка, в то время как данный прибор способен анализировать его пооборотный профиль.

### 3.2. Сведение пучков в месте встречи

В ходе экспериментов был записан процесс сведения пучков (рис.14). Процесс сведения начинается в нулевой момент времени. Видно, что размер пучка постепенно растет и выходит на некоторое равновесное состояние, при котором пучки сведены с точностью около  $0,5\sigma_y$ . После 1,3 секунды начинается точная подстройка сведения, по завершению которой пучки сводятся окончательно (заметно постепенное уменьшение размера пучка). Следует подчеркнуть, что без МАРМТ было бы невозможно произвести анализ поведения пучка, т.к. те же пикапы не позволяют следить за изменением вертикального размера. Отметим, что сводились не предельные токи, обуславливаемые эффектами встречи (около 2,8 мА на энергии 1870 МэВ), а лишь 0,6 мА электронов и 1,6 мА позитронов.

На рис.15 показано поведение центра тяжести и размеров «слабого» электронного пучка при сведении токов, ограниченных эффектами встречи:  $I_{e^+} = 3.4$  мА,  $I_{e^-} = 3.0$  мА. При развитии неустойчивости имеют место как дипольные колебания пучка, так и увеличение его вертикального размера. Каждая вспышка колебаний сопровождается частичным сбросом тока пучка.

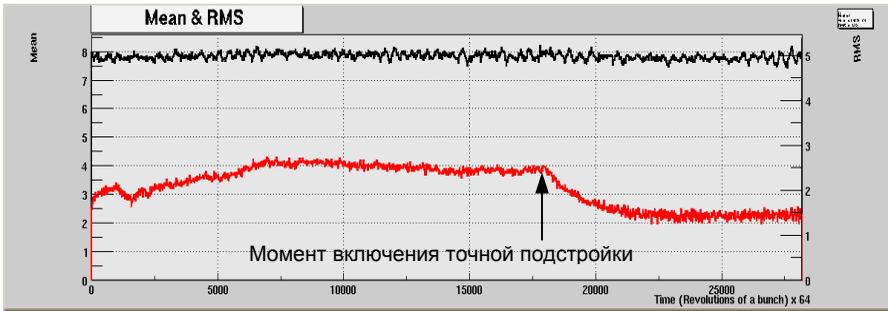


Рис. 4. Процесс сведения пучков. Верхний график – колебания центра тяжести. Нижний – вертикальный размер пучка  $\sigma_y$ .

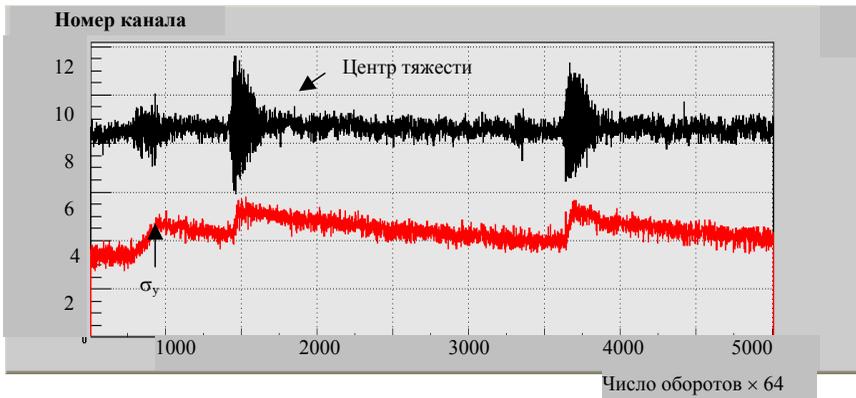


Рис. 15. Положение центра тяжести пучка (верхний график) и поведение размера пучка при сведении в месте встречи токов, ограниченных эффектами встречи.

Зачастую при сведении пучков с токами, близкими к предельным, развивается неустойчивость, хорошо видимая на изображении пучка, получаемом телекамерой.

Качественно поведение пучка можно описать как «мерцания», при этом каждая «вспышка» визуально напоминает колебания пучка при слабом ударе кикером. В действительности эти мерцания могут быть связаны с изменением вертикального размера пучка, что демонстрирует рис.16. Запуск МАРМТ синхронизован с моментом сведения, сводились токи  $I_{e^+} = 2.4$  мА,  $I_{e^-} = 2.9$  мА.

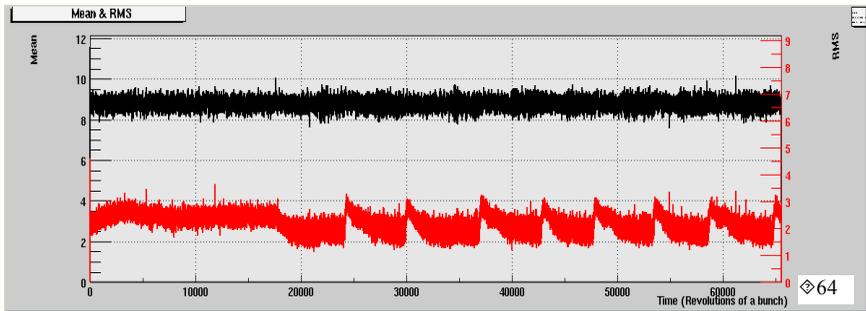


Рис. 16. Сведение в месте встречи пучков с токами  $I_{e^+} = 2.4$  мА,  $I_{e^-} = 2.9$  мА, сопровождающееся развитием квадрупольной неустойчивости.

## Заключение

С помощью многоанодного ФЭУ налажено измерение поперечного профиля пучка, измерение положения центра тяжести и размера пучка, а так же анализ частот колебаний пучка в диапазоне от нескольких Гц до сотен КГц. Разработанный прибор может использоваться как в экспериментах по физике ускорителей, так и для контроля текущих параметров коллайдера ВЭПП-4М.

## Литература

- [1] <http://vepp4-pult1.inp.nsk.su/~vepp4/vepp4m/>
- [2] Зинин Э.И. Методы измерения параметров пучков в накопителях с использованием синхротронного излучения. Диссертация на соискание степени к. ф.-м. н., ИЯФ СО АН СССР, 1978.
- [3] Transverse beam profile measurement at the VEPP-4M collider. EPAC 2002, Paris, France.
- [4] <http://root.cern.ch/>

*В.Ф. Гурко, А.Н. Журавлев, П.В. Зубарев,  
А.Н. Квашинин, В.А. Киселев, О.И. Мешков,  
Н.Ю. Мучной, А.Д. Хильченко*

**Многоанодный ФЭУ  
для оптической диагностики пучка  
на коллайдере ВЭПП-4М**

*O.I. Meshkov, V.F. Gurko, A.N. Zhuravlev, P.V. Zubarev,  
V.A. Kiselev, N.Yu. Muchnoi, A.N. Selivanov,  
V.V. Smaluk, A.D. Khilchenko*

**VEPP-4M optical beam profile monitor  
with one-turn temporal resolution**

ИЯФ 2004-81

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев  
Работа поступила 29.12.2004

---

Сдано в набор 30.12.2004

Подписано в печать 30.12.2004

Формат 60x90 1/16 Объем 1.2 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 115 экз. Бесплатно. Заказ № 81

---

*Обработано на IBM PC и отпечатано  
на ротапринтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН  
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*