



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2011–12

ОЭФ/ОЭА

А.А. Волков, В.П. Ефремов, Н.С. Иванова, А.Ю. Калинин,  
А.В. Кораблёв, А.В. Кошелев, А.Н. Криницын, В.И. Крышкин,  
Н.В. Кулагин, А.Ф. Лукьянцев, С.В. Маконин, А.А. Матюшин,  
В.П. Милюткин, Ю.А. Мишагин, В.С. Селезнев, В.В. Скворцов,  
А.Ю. Сотников, В.В. Талов, Л.К. Турчанович

## **Мониторы интенсивного пучка установки ФОДС**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2011

**Аннотация**

Волков А.А. и др. Мониторы интенсивного пучка установки ФОДС: Препринт ИФВЭ 2011-12. – Протвино, 2011. – 16 с., 11 рис., библиогр.: 12.

Для измерения интенсивности и контроля качества пучка установки ФОДС разработана система мониторинга, включающая ионизационные и сцинтилляционные мониторы. Система рассчитана на работу с интенсивностью пучка от  $10^4$  до  $10^9$  частиц/с. Приводятся характеристики элементов системы.

**Abstract**

Volkov A.A. et al. Intensive beam monitors of spectrometer FODS.: IHEP Preprint 2011-12. – Protvino, 2011. – p. 16, figs. 11, refs.: 12.

To measure the intensity and to control the beam quality of FODS spectrometer there was developed a monitor system including ionization chambers and scintillation monitors. The system is oriented on operation with beam intensities from  $10^4$  to  $10^9$  particles/s. The operational characteristics of the elements and the system as a whole are presented.

## Введение

Установка ФОДС (Фокусирующий Двухплечевой Спектрометр) [1] создана для измерения редких процессов, что требует предельной светимости. Поэтому интенсивность падающего пучка канала № 22 [2] ограничивается только величиной, при которой эффективность реконструкции траектории частиц в дрейфовых камерах начинает падать. Это происходит при загрузке камер около  $3 \times 10^6$  частиц/с, что соответствует интенсивности пучка  $5 \times 10^8$  частиц/с для ядерных мишеней толщиной  $\sim 0,1$  ядерной длины взаимодействия. Такую интенсивность можно измерять только относительными мониторами, которые требуют калибровки. Для измерения интенсивности и пространственного распределения пучка были созданы ионизационные камеры [3]. Существовавшая ранее на установке ФОДС система диагностики [4] к 2008 году физически устарела и требовала модернизации, важной частью которой являлось создание новых модулей аналоговой электроники. Эти модули должны были быть интегрированы в существующую систему автоматизированной диагностики каналов выведенных пучков ИФВЭ [5], которая эксплуатируется с 2002 г.

Для калибровки ионизационных камер и контроля временных характеристик пучка создана система сцинтилляционных счётчиков.

В работе представлена структура системы мониторинга и её отдельные элементы. Описывается процедура калибровки, контроля качества пучка и приводятся характеристики элементов системы.

## 1. Система мониторинга пучка

Система мониторинга пучка, расположенная перед анализирующим магнитом ФОДС, показана на рис. 1. Состав пучка – примесь пионов в поляризованном пучке протонов. Выделение электронов контролируется пороговыми черенковскими счётчиками  $\check{C}_i$ . Интенсивность пучка и его положение в пространстве измеряются ионизационными камерами  $IC_i$  и сцинтилляционными годоскопами  $H_B$ . Набор сцинтилляционных счётчиков используется для абсолютной калибровки мониторов, относительного мониторинга и контроля качества пучка.

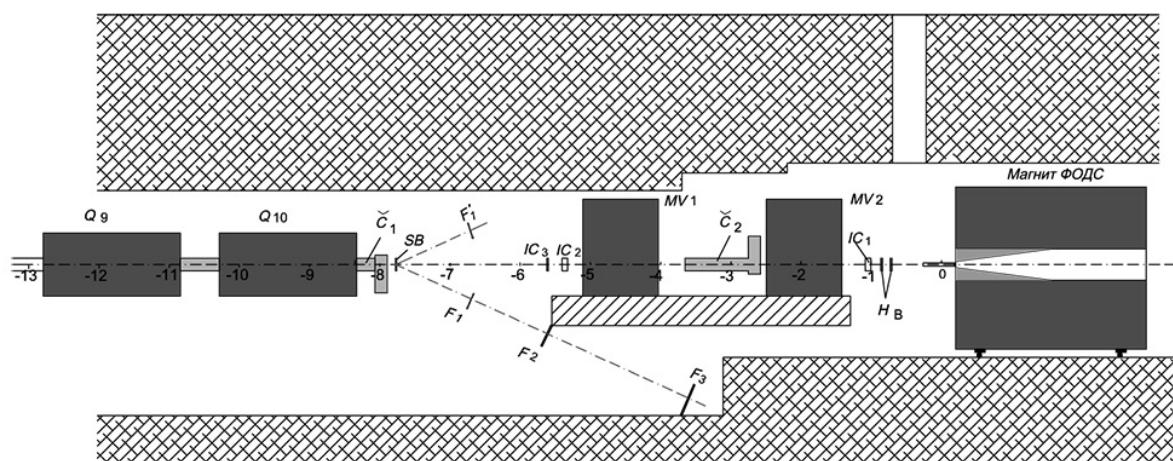


Рис. 1. Система мониторинга пучка, установленная на канале № 22 перед ФОДС:  $Q_i$  – квадрупольные линзы;  $MV_i$  – отклоняющие в вертикальной плоскости магниты;  $\check{C}_i$  – черенковские пороговые счётчики;  $IC_i$  – ионизационные камеры;  $H_B$  – сцинтилляционные годоскопы;  $SB$  и  $F_i$  – сцинтилляционные счётчики.

## 2. Сцинтилляционные мониторы

Первым по пучку установлен счётчик  $SB$  со сцинтиллятором диаметром 180 мм и толщиной 10 мм, просматриваемый ФЭУ ХР 2020. Толщина сцинтиллятора выбрана для максимального счёта сцинтилляционного телескопа  $F$ , для которого счётчик  $SB$  является мишенью. Высоковольтный делитель ФЭУ, использующий для стабилизации усиления фотоумножителя схему со стабилитронами, как показали стендовые испытания, обеспечивает линейность усиления вплоть до потоков частиц  $2 \times 10^6$  1/с.

Сцинтилляционный телескоп F, состоящий из 3 счётчиков, направлен на счётчик SB. Соотношение счёта этого телескопа (совпадения 3 счётчиков на ФЭУ-85) и интенсивности пучка около  $10^{-3}$ .

Над счётчиком  $F_1$  установлен счётчик  $F_1'$ , имеющий такие же геометрические размеры сцинтиллятора. Эти счётчики включены в совпадения, причём в один из счётчиков введена задержка для исключения истинных совпадений.

Для контроля работы мониторов на всех сцинтилляторах счётчиков установлены ультрафиолетовые светодиоды, на которые подаются сигналы с генератора перед каждым циклом интенсивности ускорителя.

Логическая схема регистрации информации со сцинтилляционных мониторов представлена на рис. 2. Сформированные ( $\Phi$ ) сигналы с фотоумножителей подаются на схемы совпадений и на счётчики.

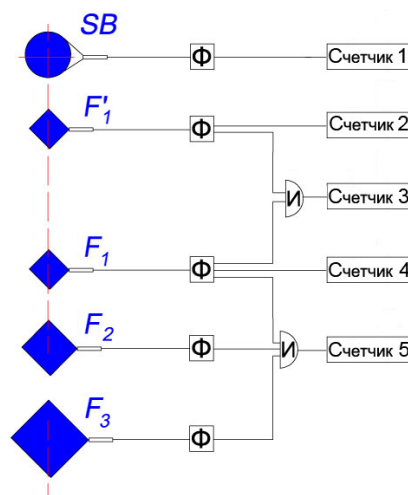


Рис. 2. Логическая схема электроники сцинтилляционных мониторов:  
 $\Phi$  – формирователь, И – схема совпадений.

Информация со сцинтилляционных счётчиков  $F_1$  и  $F_1'$  используется для оценки равномерности распределения интенсивности пучка в течение сброса по отношению

$$T = [2 \times \tau \times (n_1/t) \times (n_2/t)] / (n/t),$$

где  $n$  – число случайных совпадений этих счётчиков (число отсчётов счётчика 3),  $\tau$  – разрешающее время схемы совпадения,  $n_1$  и  $n_2$  – число отсчётов счётчиков 2 и 4

(см. рис. 2),  $t$  – длительность цикла ускорителя. В идеальном случае это отношение равно 1. Измерения показали, что отношение числа триггеров к показаниям ионизационного монитора интенсивности не меняется вплоть до величины  $T=0,5$ . Поэтому только при  $T<0,5$  начинается диалог со службами ускорителя и вывода пучка.

### 3. Ионизационные мониторы

Ионизационные камеры работают на воздухе в интегральном режиме, т. е. регистрируют суммарный сигнал за всё время вывода пучка.

Система сбора и обработки информации о пучке [6] базируется на свободно распространяемом программном инструментарии EPICS [7] и имеет многоуровневую организацию. На нижнем уровне системы находятся каркасы предварительной (аналоговой) электроники. На среднем уровне – крейт VME, в котором размещаются контроллер mvme-167 (с операционной системой vxWorks [8]), модуль управления VTG и модули АЦП [9]. Далее крейт вместе с содержащейся в нем аппаратурой будем называть ИОС (Input/Output Controller) в терминологии EPICS [10]. На верхнем уровне находятся персональные компьютеры (консоли управления), расположенные в центральной пультовой каналов или на рабочих местах пользователей (рис. 3).

На консолях управления реализованы:

- отображение характеристик пучка и его профиля в графическом виде;
- интерфейсы для настройки режимов работы аналоговой электроники и ИОС;
- архивирование данных и просмотр архива;
- программы передачи данных о пучке в каждом цикле ускорителя на сервер автоматизации (для ее распространения потребителям);
- программа подготовки и передачи информации с измерителя интенсивности  $IC_3$ , профилометров  $IC_1$  и  $IC_2$  (рис. 1) на пультовую установки ФОДС.

Следует отметить, что сбор и первичная обработка информации о профилях и интенсивности пучка в каждом цикле протонного синхротрона У-70 реализованы, в основном, на уровне ИОС.

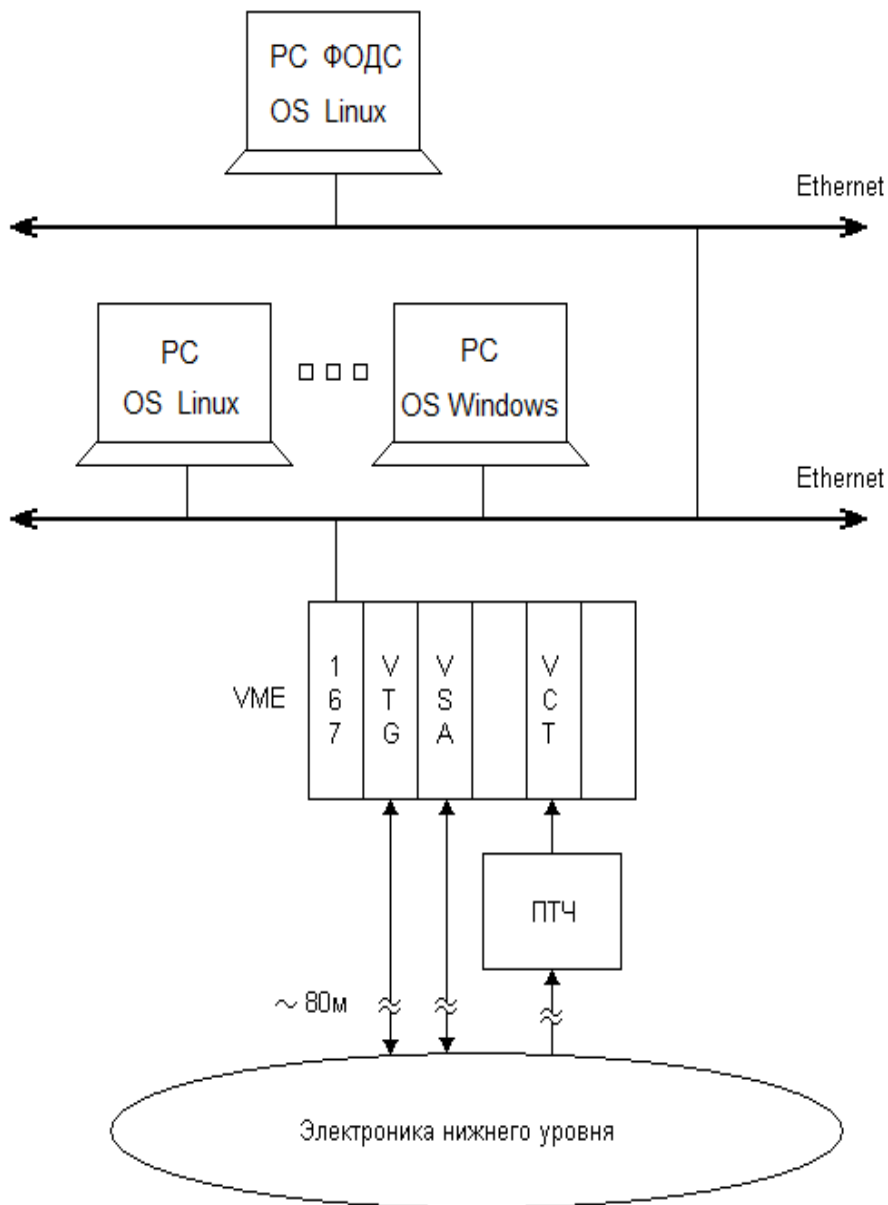


Рис. 3. Структура системы диагностики пучка установки ФОДС: 167 – процессор крейта Motorola 167; VTG – комбинированный таймерный модуль, предназначенный для управления выбором сигналов с профилометров, таймирования запуска многоканальных АЦП и управления режимом интеграторов; VSA – 12-разрядный 16-канальный АЦП, предназначенный для измерения сигналов с профилометров и промежуточного хранения результатов измерения; VCT – 8-канальный блок счётчиков, предназначенный для счёта импульсов, поступающих с выхода преобразователя тока в частоту системы измерения интенсивности.

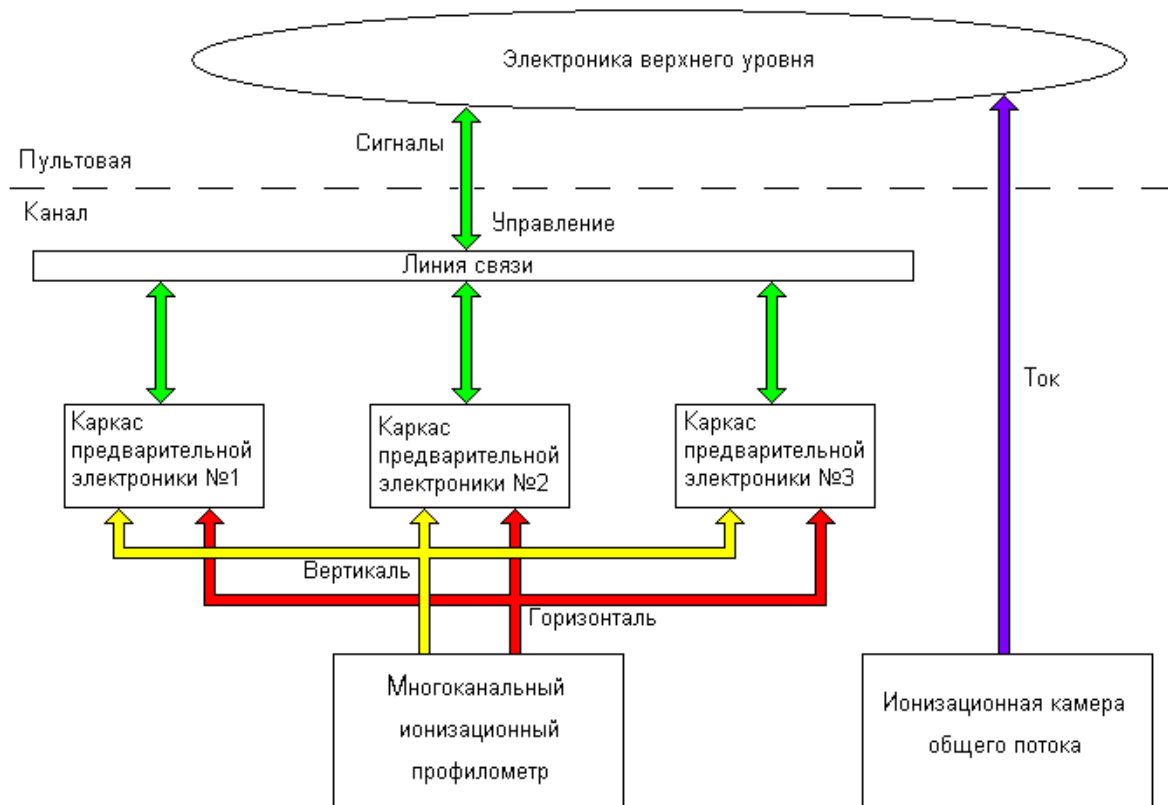


Рис. 4. Структурная схема электроники нижнего уровня системы диагностики.

### 3.1. Измерение профилей

Нижний уровень электроники реализован на стандартных в ИФВЭ каркасах [11], что позволило включить оба профилометра в имеющуюся в канале систему магистральных кабелей для измерения профилей. Отличительной особенностью данных многоканальных ионизационных камер является увеличенное количество каналов (по сравнению со стандартными камерами [12]), а также разная ширина и шаг групп электродов в обеих плоскостях, что привело к необходимости использования дополнительных каркасов накамерной электроники и изменения алгоритмов обработки информации на среднем уровне (рис. 4).

Профилометры установки ФОДС имеют в каждой плоскости по сорок информационных каналов с различными шагами. Структура и размер шагов одной из плоскостей представлены на рис. 5.



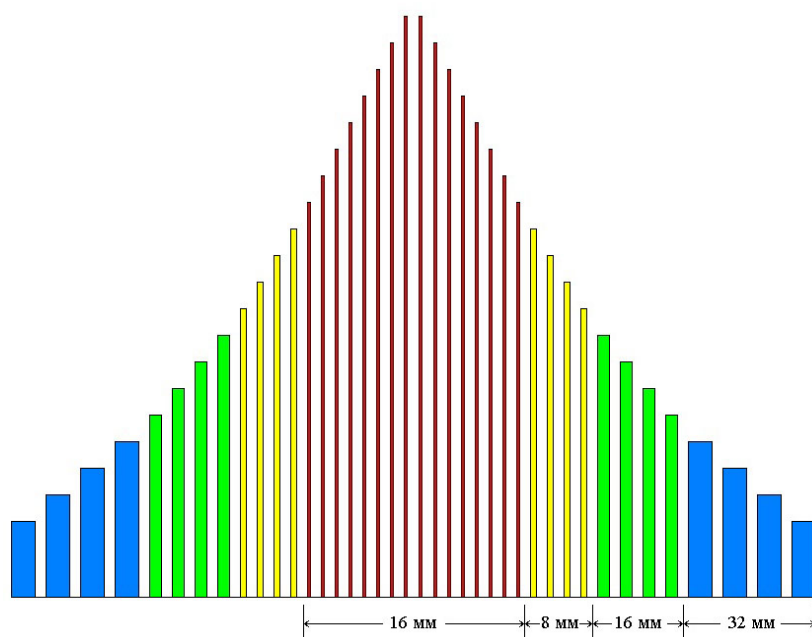


Рис. 5. Условное изображение измерительной плоскости профилометров ФОДС.

Основным модулем предварительной электроники является восьмиканальный блок интеграторов I-8 (рис. 6). В каждом корпусе находится по 4 таких устройства, обеспечивая 32 канала измерения профиля пучка.

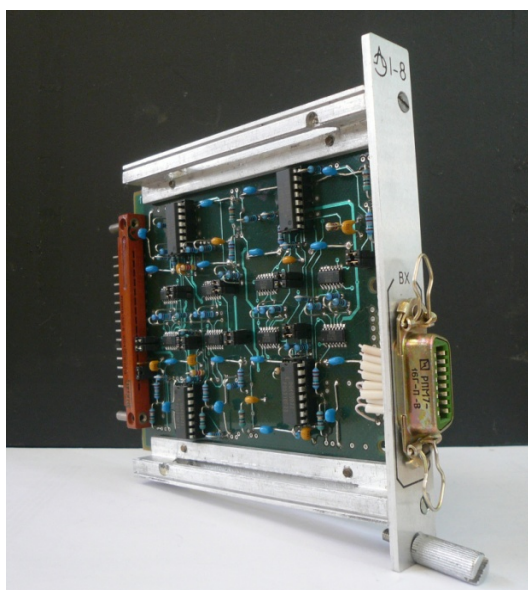


Рис. 6. Модуль I-8 – основной блок электроники нижнего уровня.

Модуль выполнен на основе прецизионной микросхемы IVC102, обладающей малыми токами утечки и имеющей встроенные интегрирующие конденсаторы (10, 30 и 60 пФ) для регулирования коэффициентов усиления. Для расширения диапазона интегрирования на плате установлены внешние конденсаторы большей ёмкости. Переключение осуществляется оператором дистанционно из пультной канала путём выставления соответствующего режима через интерфейс программы отображения информации. Выбором определённых номиналов интегрирующих конденсаторов можно добиться желаемых коэффициентов усиления и их соотношений для широкого спектра входных токов.

С выходов интеграторов сигналы по кроссу каркаса поступают на 32-канальный аналоговый коммутатор АК-32 и далее по коаксиальному кабелю передаются на вход АЦП, находящегося в крейте VME в пультной каналов.

### 3.2. Измерение интенсивности

Как уже указывалось выше, датчик интенсивности представляет собой ионизационную камеру общего потока. Сигнал с неё по коаксиальному кабелю передаётся на вход преобразователя тока в частоту (ПТЧ), находящегося в каркасе на пультной каналов (рис. 7).

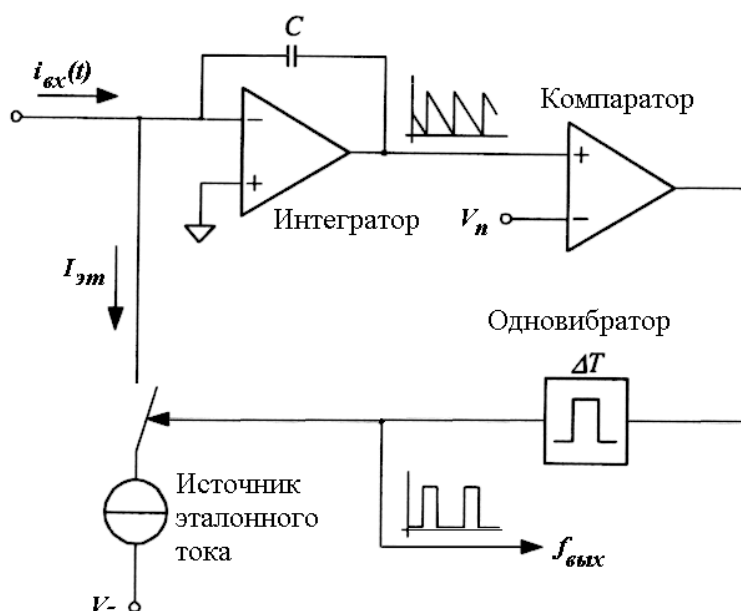


Рис. 7. Преобразователь тока в частоту.

Преобразователь выполнен по схеме интегратора (ОРА 627) с компенсированным зарядом. Разряд конденсатора осуществляется фиксированным эталонным током. Сигнал с выхода интегратора поступает на компаратор (NE521), который сравнивает входное напряжение с опорным и при достижении порогового уровня ( $V_n$ ) запускает мультивибратор. Выходные импульсы мультивибратора управляют ключом, замыкающим источник эталонного тока на вход интегратора. Они же являются выходным сигналом преобразователя, эквивалентным входному току.

Преобразователь ток–частота работает в широком диапазоне (100 пкА–300 мкА) входных токов. Линейность преобразования тока в частоту (в области малых токов: с 5 нА) иллюстрирует рис. 8. Импульсы ПТЧ подаются на 16-разрядный счётчик с максимальной скоростью счёта 8 МГц.

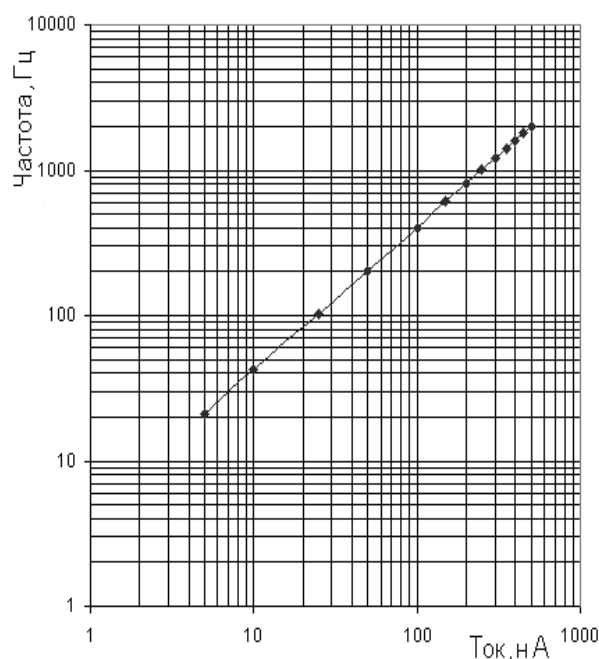


Рис. 8. Зависимость частоты выходных импульсов от входного тока.

### 3.3. Отображение информации

Для решения задач сбора данных с профилометров ФОДС и их обработки, представления данных на консольных ПК и передачи данных на установку ФОДС программное обеспечение системы диагностики [6] было дополнено рядом процедур.

В отличие от стандартной схемы, где каждая камера-профилометр соединяется с модулями АЦП посредством одного каркаса, каждая нестандартная камера соединяется с модулями АЦП с помощью трех таких каркасов. Поскольку номера каркасов и каналов подключения могут меняться, в ПО ИОС сформирована таблица соответствия.

Для осуществления настройки и управления пучком операторам консоли требуются различные режимы (точности) отображения информации. Поначалу – укрупненная гистограмма профиля пучка, охватывающая большой диапазон, затем более точная и более локализованная. Поэтому были реализованы четыре режима отображения показаний датчиков камер ФОДС: с шагами 8, 4, 2, и 1 мм. Для каждого режима вычисляются суммарный заряд по каждой плоскости камеры (вертикальной и горизонтальной), смещение центра тяжести пучка, среднеквадратическое отклонение от центра пучка.

В системе диагностики собранная, упорядоченная и предварительно обработанная в ИОС информация поступает на консольный компьютер для визуализации средствами EPICS.

Для четырех режимов отображения гистограмм профилей пучка в канале установки ФОДС был разработан программный модуль, в котором обрабатываются массивы данных, подготовленные на среднем уровне. Оператору на консоли предоставляется меню, в котором он может выбирать режимы отображения по своему усмотрению. На экране допускается наличие всех 4 режимов или меньшего количества, при этом на дисплей выводятся две гистограммы (горизонталь и вертикаль). Кроме гистограмм отображаются характеристики пучка и величина интенсивности, измеренная датчиком интенсивности. В настроенном режиме инженер-оператор обычно использует лишь 16 центральных каналов плоскости с шагом 1 мм. На рис. 9 представлены профили пучка перед мишенью ФОДС, снятые с различными шагами.

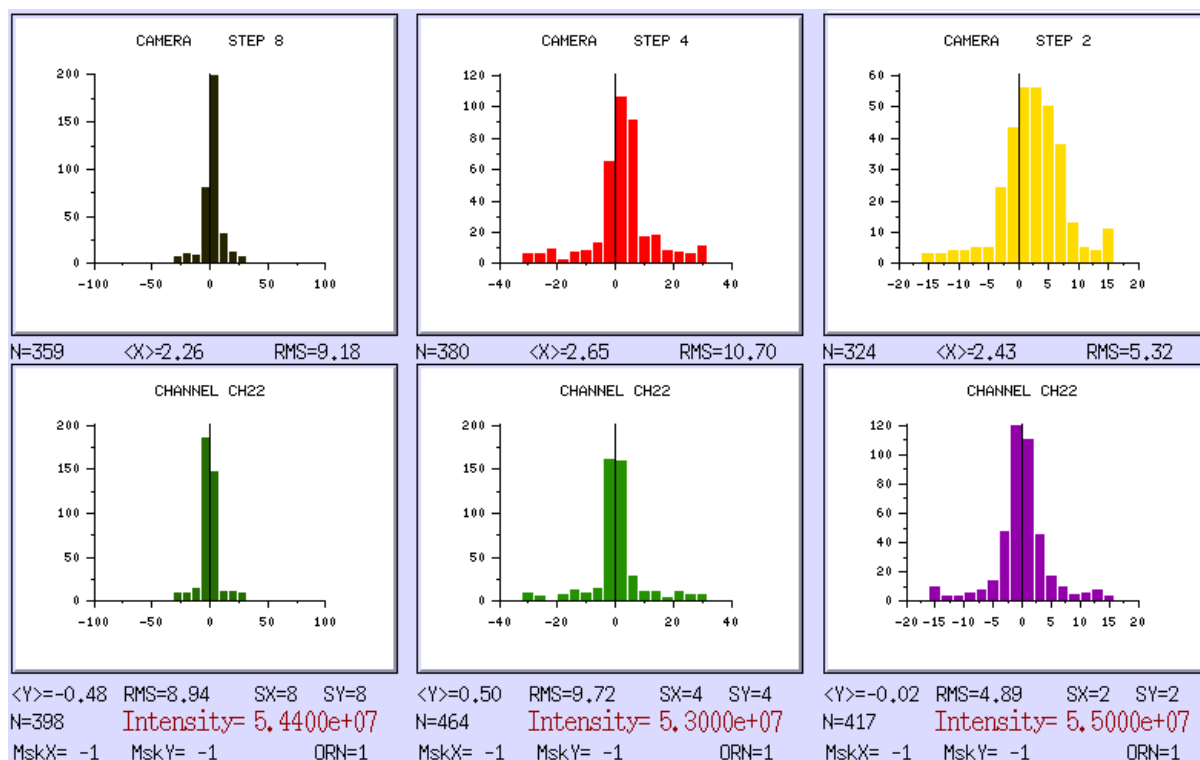


Рис. 9. Профили пучка на детекторе IC<sub>1</sub> с шагом 8, 4 и 2 мм соответственно.

### 3.4. Передача данных на установку ФОДС

Основные измеренные и вычисленные данные о пучке в каждом цикле ускорителя передаются из ИОС на консольный компьютер. Для передачи информации на ФОДС была написана программа, которая функционирует на верхнем уровне (на консоли) и является сетевым клиентом. Ее партнером служит программа-сервер, работающая на компьютере ФОДС. После очередного вывода пучка программа-клиент ожидает информацию из ИОС. В ИОС происходит чтение данных от аппаратуры в момент прохождения пучка, затем задержка, после которой снимаются показания датчиков в отсутствие пучка – чтение пьедесталов. Полученная информация предварительно обрабатывается в ИОС: вычитаются пьедесталы, учитывается ориентация и полярность, выполняется преобразование форматов и пр. Время чтения данных (равное времени чтения пьедесталов) и время задержки устанавливает инженер-оператор канала вывода. В последнем сеансе эти величины были равны 2 и 1,5 секундам соответственно. Таким образом,

приблизительно через 5–6 секунд после вывода пучка программа, работающая на консоли, получает информацию от ИОС, формирует пакет данных, устанавливает соединение по сети с компьютером ФОДС и посылает пакет.

Программа на компьютере ФОДС после вывода пучка читает данные со счетчиков каркаса СУММА о мониторах и триггерах, что занимает около секунды. После этого она в качестве сетевого сервера разрешает клиенту выполнить входящее соединение. После получения данных происходит запись информации на жесткий диск. По завершении передачи клиент и сервер закрывают соединение и входят в режим ожидания нового цикла ускорителя. Передаваемые данные включают номер цикла ускорителя (отсчет идет от условного нуля, который устанавливается при загрузке ИОС), значение и коэффициент интенсивности, коэффициенты усиления (параметры электроники), массивы измеренных показаний датчиков ионизационных камер для горизонтальной и вертикальной плоскостей. В случае проблем с получением данных от ИОС выставляется специальный флаг (номер цикла равен –1).

#### **4. Калибровка мониторов**

Калибровка относительного монитора интенсивности (ионизационная камера IC<sub>3</sub>) производится по сцинтилляционному счётчику SB, перекрывающему весь пучок, при изменении интенсивности падающего пучка в диапазоне ( $10^4 - 10^7$ ) частиц/с. На рис. 10 показан пример такой калибровки – зависимость счета SB от показаний ионизационного монитора интенсивности (IM). По определению ионизационный монитор является линейным во всём диапазоне интенсивности (до  $10^9$  частиц/с), и по нему определяется диапазон линейности прежде всего счётчика SB. В этом диапазоне по показаниям счётчика SB определяются калибровочные коэффициенты относительных мониторов. Точность определения калибровочных коэффициентов лучше процента. Точность мониторинга определяется долговременной стабильностью мониторов – зависимостью от температуры, давления воздуха и т.д. – и оценивается в 20%.

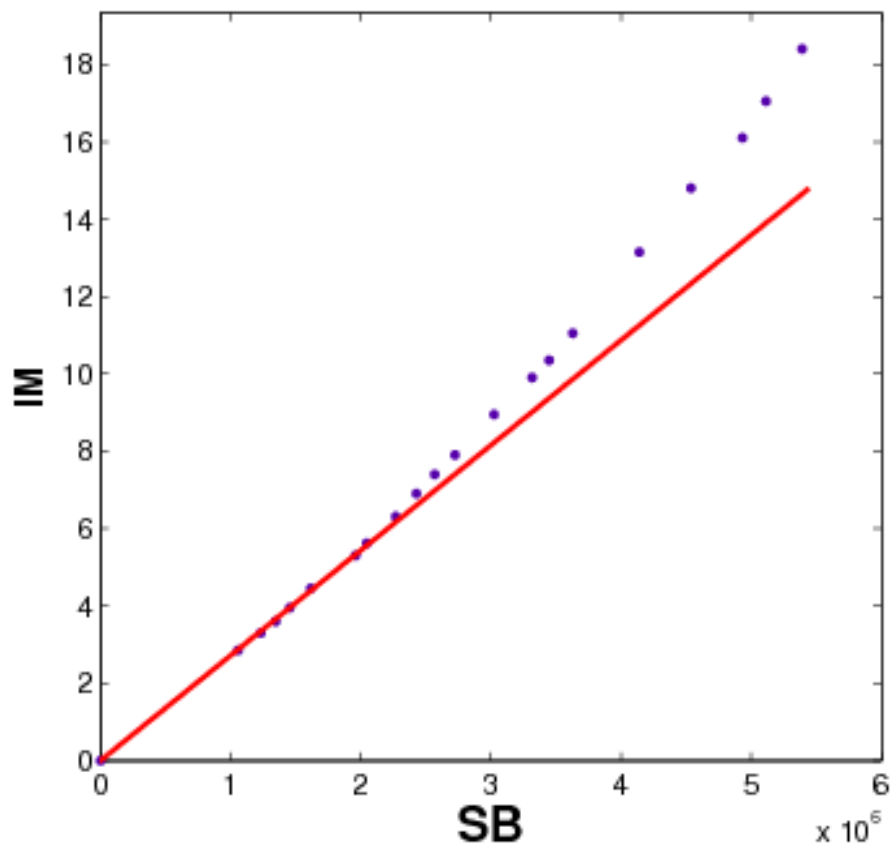


Рис. 10. Зависимость счёта пучкового сцинтиляционного счетчика (SB) от показаний ионизационного монитора.

Важнейшими параметрами, определяющими качество экспозиции, являются:

- равномерность интенсивности пучка во времени;
- показания относительных мониторов;
- отношение числа инклюзивных триггеров в каждом плече к ионизационному монитору;
- распределение интенсивности пучка на мишени установки по горизонтали и вертикали.

После каждого цикла вывода пучка с ускорителя все эти величины отображаются на мониторе установки ФОДС, как показано на рис. 11.

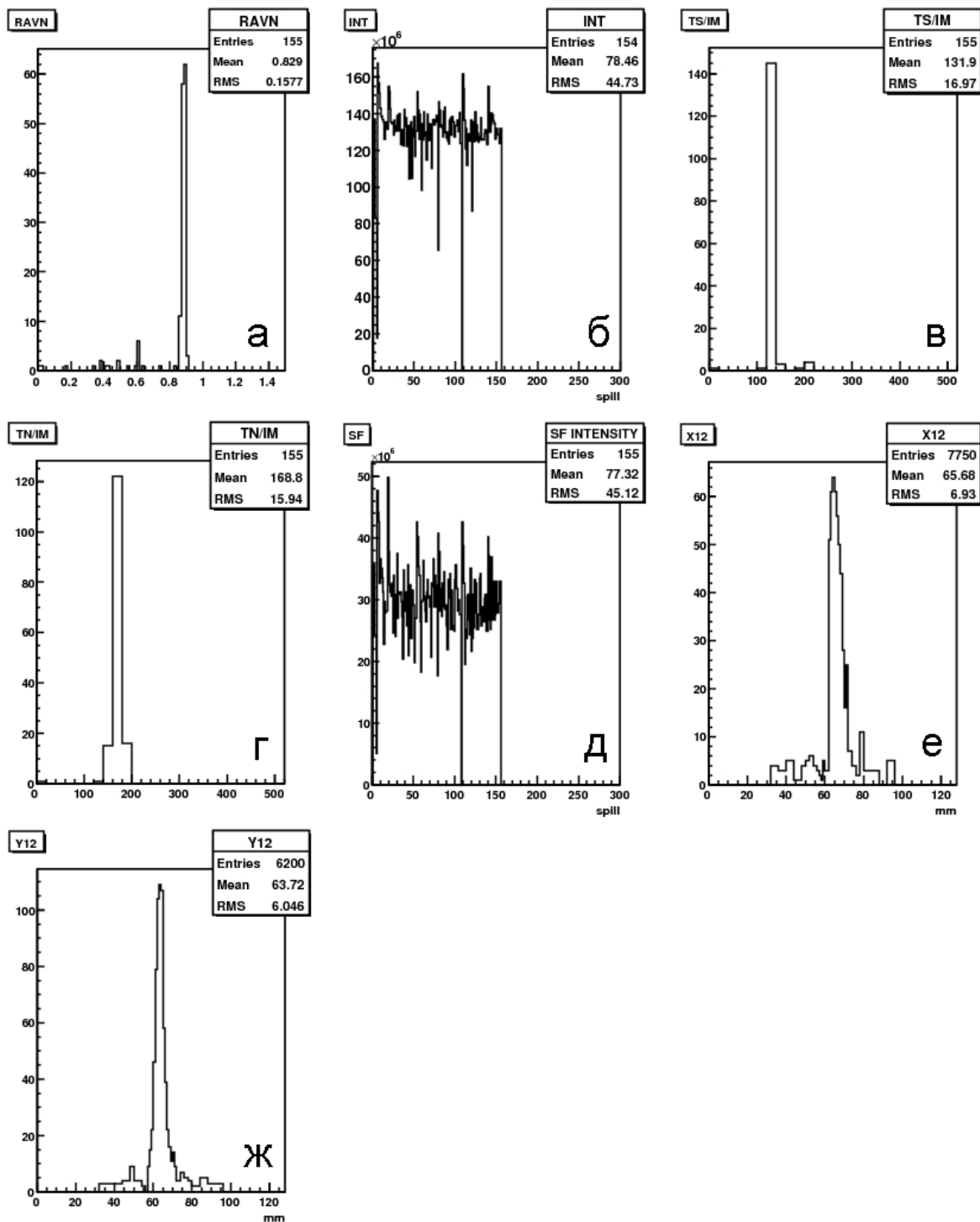


Рис. 11. а) эффективная растяжка пучка; б) интенсивность пучка в текущем сбросе по показаниям ионизационного монитора; в) и г) отношение числа триггеров в плечах спектрометра (S и N) к показаниям ионизационного монитора; д) распределение показаний относительных мониторов интенсивности пучка; е) и ж) распределение пучка протонов на мишени ФОДС по горизонтали и вертикали.



## Заключение

Созданная система мониторинга позволяет оперативно контролировать интенсивность пучка в диапазоне  $10^4 - 10^9$  частиц/с, качество пучка – пространственные характеристики и равномерность интенсивности в течение цикла, а также глобальные характеристики установки.

## Список литературы

- [1] Абрамов В.В., Алексеев А.В., Балдин Б.Ю. и др. // ПТЭ, 1992, т. 6, с. 75.
- [2] Афонин А.Г., Галяев Н.А., Гресь В.Н. и др. Универсальный высокоинтенсивный канал пучков частиц на ускорителе ИФВЭ (канал 22). – Препринт ИФВЭ 90-38, Протвино, 1990.
- [3] Вражнов Ю.Н., Дышкант А.С. Многоканальные детекторы системы мониторинга установки ФОДС. // ПТЭ, 1982, т. 25, с. 69.
- [4] Дышкант А.С., Суляев Р.М. // ПТЭ, 1984, т. 3, с. 23.
- [5] Иванова Н.С., Ковальцов В.И., Кошелев А.В. и др. Модернизация системы диагностики каналов транспортировки выведенных пучков частиц U-70. – В сб.: «Труды XVIII Совещания по ускорителям заряженных частиц RUPAC-2002», Обнинск, Россия, 1–4 октября 2002.
- [6] V.Kovaltsov, A.Matyushin, V.Milyutkin, I.Romanov, V.Seleznev, A.Sytin, M.Clausen. – Upgrading of the beam diagnostic system of U-70 beam transfer lines. Материалы совещания ICALEPCS-2001, San Jose, California USA, Oct. 2001.
- [7] <http://www.aps.anl.gov/epics>
- [8] VxWorks Programmers's Guide/ WindRiver Systems, 1994.
- [9] Матюшин А.А. – Препринт ИФВЭ 2002-13, Протвино, 2002.
- [10] J.Anderson, M.Kraimer: EPICS Input/Output Controller (IOC) Record Reference Manual, Argonne National Laboratory, Advanced Photon Source, December 1, 1994 – DRAFT APS Release 3.

- [11] Галяев Н.А., Гресь В.Н., Давыденко Ю.П. и др. Система измерения профилей пучка на протяжённой трассе канала транспортировки заряженных частиц. – Препринт ИФВЭ 85-61, Серпухов, 1985.
- [12] Гресь В.Н., Давыденко Ю.П., Лапицкий С.Н. и др. «Тонкая» камера для измерения профилей интенсивных пучков заряженных частиц высоких энергий. // ПТЭ, 1985, т. 3, с. 27.

*Рукопись поступила 21 июня 2011 г.*

А.А. Волков и др.

Мониторы интенсивного пучка установки ФОДС.

Редактор Л.Ф. Васильева.

---

Подписано к печати 27.06.2011.                      Формат 60 × 84/16.      Офсетная печать.  
Печ.л. 1,12.      Уч.– изд.л. 1,73.                      Тираж 80.      Заказ 60.                      Индекс 3649.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2011-12, ИФВЭ, 2011

---