



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

Препринт 2024-3

Д.Р. Еремеев, А.В. Ивагин, В.Д. Матвеев, Е.В. Назаров,  
Ю.А. Хохлов<sup>1</sup>, Е.В. Чернов, А.А. Шумаков

Модернизированные пропорциональные камеры  
установки ВЕС

---

<sup>1</sup> также МФТИ, ФИЗТЕХ

**Аннотация**

Д.Р. Еремеев, А.В. Ивашин, В.Д. Матвеев, Е.В. Назаров, Ю.А. Хохлов, Е.В. Чернов, А.А. Шу-маков. Модернизированные пропорциональные камеры установки ВЕС: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2024-3. – Протвино, 2024. – 17 с., 12 рис.

Работа посвящена пропорциональным камерам одного из типов, используемых на установке ВЕС. Представлены особенности конструкции и технологии, оригинальная методика проверки качества. Отдельно рассмотрена система регистрирующей электроники.

**Abstract**

Eremeev D.R. et al. Upgraded proportional chambers of the VES setup: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2024-3. – Protvino, 2024. – p. 17, figs. 12.

This article focuses on one type of proportional chamber used in the VES setup. It presents the special features of the design and technology, along with original methods for quality control. The article also describes the registering electronic system.

## 1. Введение

Установка ВЕС на ускорительном комплексе У-70 (г. Протвино) представляет собой широкоапертурный магнитный спектрометр с электромагнитной калориметрией и идентификацией вторичных заряженных частиц. Она работает на пучке преимущественно пионов с типичными импульсом 29 ГэВ/с и интенсивностью  $\approx 2 \cdot 10^6/\text{с}$ , с ядерными мишенями толщиной  $\sim 0.1$  ядерной длины. Установка включает трековую систему из нескольких десятков плоскостей газовых детекторов, описанную в начальной версии в [1]. За прошедшее время почти все трековые детекторы были существенно модернизированы. Это касается и части головных пропорциональных камер (ПК), устаревших морально и физически. Головные ПК размещены после мишени установки перед спектрометрическим магнитом. Они играют определяющую роль в нахождении углов вылета вторичных частиц и (вместе с пучковыми камерами) вершин их образования, а также совокупно с остальной частью спектрометра измеряют импульс частиц. Камеры установлены на подвижной платформе. За тремя первыми однотипными камерами следуют пять камер другого типа (рис. 1), так называемые «РС 40 × 60», которые и являются предметом данной работы. Основными целями их глубокой модернизации явились: повышение надежности работы камер и их ремонтпригодности; улучшение эксплуатационных характеристик; переход на накамерную электронику высокой степени интеграции.

## 2. Модернизация конструкции камер РС 40 × 60

Это двухплоскостные камеры для измерения X и Y координат<sup>1</sup> с внешними размерами  $X \times Y = 73 \times 53 \text{ см}^2$  и апертурой  $\sim 60 \times 40 \text{ см}^2$ . Конструкция<sup>2</sup> традиционна, исходно аналогична конструкции камер из [2] и представляет собой пакет из нескольких прямоугольных рамок. Три рамки из сплава Д16Т толщиной 10 мм несут

---

<sup>1</sup>Используются оси координат: Z – по ходу пучка, Y – вверх, X – дополняет до правой тройки

<sup>2</sup>Комплект КД от конструкторского отдела ИФВЭ 6966-00-00-00



Рис. 1. Группа камер РС  $40 \times 60$  на выдвинутой из магнита платформе. Вид со стороны подсоединения газовых трубок и высоковольтных кабелей. Сверху – комплекты электроники X-плоскостей в экранах. Над платформой виден коричневый экран магнита установки.

изолированные от корпуса катоды, два на центральной рамке и по одному на крайних. Катоды набраны из 100-микронной проволоки из бериллиевой бронзы БрБ2. На двух торцах центральной катодной рамки выполнены отверстия со штуцерами для подсоединения газовых трубок. Между парами катодов размещаются по две стеклотекстолитовых рамки толщиной 5 мм, одна сигнальная, другая проставочная, для задания величины анод-катодного зазора. Катодные и проставочные рамки были использованы в модернизированных камерах в неизменном виде. Практически все остальные детали, узлы и системы подверглись полной или частичной переделке.

Взаимное положение рамок в пакете, определяющее ортогональность сигнальных проволок, задается точными угловыми отверстиями и втулками, проходящими через них. Пакет стянут по периметру латунными болтами. С торца пакета в сборе монтируются кронштейны с разъемами для подачи высокого напряжения на катоды. Для герметизации служит резиновый шнур круглого сечения, уложенный в пазы на рамках. Прямоугольное сечение паза равно по площади сечению шнура, так что шнур при затяжке болтов заполняет паз и не нарушает расчетный анод-катодный зазор. Апертура внешних рамок закрыта окнами из прозрачной ПЭТ-пленки толщиной 50 мкм, приклеенными герметиком ВГО-1 и прижатými планками. Ограниченный окнами без учета их растяжения объем камеры составляет около 15 л. В условиях значительного облучения и довольно большого газового усиления камеры работают при непрерывном продуве рабочим газом со скоростью обмена около 1 объема/ч. Требования на герметичность камер при их испытании на утечку с избыточным давлением на выходе в несколько мм водяного столба (уровень масла в масляном затворе) – до 2 л/ч.

Сигнальные рамки камер изготовлены в ЦОП ИФВЭ фрезерованием из листового стеклотекстолита СТЭФ. Аноды набраны из 30-микронной позолоченной вольфрам-рениевой (W 97%, Re 3%) проволоки, распаянной с шагом 2 мм на ламели печатных сигнальных плат (СП). Плоскость X (для измерения соответствующей координаты трека) содержит 288 чувствительных проволок, плоскость Y – 192. На краях плоскостей для уменьшения напряженности поля добавлены по 2 охранные проволоки из того же материала, что и катодные. Ламели СП на стороне съема сигнала выведены на печатный разъем РСІе x4. Для повышения надёжности контакта для каждой проволоки, за исключением двух проволок с каждого края, используются по две ламели разъёма РСІе на противоположных сторонах. На крайних проволоках с одиночными ламелями освободившиеся ламели используются для заземления охранных проволок. На плате ПП-1 (см. далее) на крайних парах каналов предусмотрен выбор работы с двойными или одиночными ламелями при помощи съёмных перемычек. Платы вклеены на эпоксидной смоле ЭД-20 с отвердителем ПЭПА в пазы, отфрезерованные в рамке. Положение СП относительно точных отверстий рамки контролируется при вклейке визуалью с точностью лучше 0.5 мм по предусмотренным реперам.

Во избежание зависимости катод-анодного расстояния от совокупной толщины системы «паз – клей – СП» проволока со стороны апертуры рамки опирается на оставленный при ее фрезеровании буртик (рис. 2). Плата вклеена гарантированно ниже буртика, но с как можно меньшей ( $< 0.1$  мм) разницей высот. Для регулировки

высоты подъёма платы индивидуально подбирались прокладки из стеклотекстолита толщиной с шагом 0.1 мм, с измерением суммарной толщины пакета микрометром. Это позволяет изготавливать СП без излишне жёстких допусков и при этом обеспечить охват проволоки валиком расплавленного припоя при его нанесении на ламель. При чрезмерном углублении СП в рамку пайка оказывается ненадежной, так что проволоки вытягиваются из неё при эксплуатации камеры. Использовался припой Asahi (Sn 60%, Pb 40%) диаметром 0.6 или 1 мм с наполнением канифольным флюсом FC5000 типа RMA и дополнительным жидким флюсом в составе 75% изопропанола и 25% сосновой канифоли (по массе). В качестве покрытия контактных площадок при изготовлении СП применялось иммерсионное серебро. Температура жала составляла 290°C. Остатки флюса смывались изопропанолом.

Монтаж проволок на сигнальную рамку производился по распространенной технологии: в начале все проволоки натягиваются на точные винты за габаритами и слегка выше рамки. Винты, задающие шаг, выдерживают без деформации натяжение сотен проволок. Затем одним прижимом в виде гребенки проволоки прижимаются к рамке и припаиваются к ее ламелям. После снятия прижимов концы проволок, выходящие за ламели, обрезаются. Шаг проволок на различных этапах монтажа – без прижимов, с прижимами до распайки, после распайки – проверялся оригинальным оптическим методом, кратко изложенным ниже.

Над монтажным столом с инспектируемой рамкой на высоте 1 м, достаточной для захвата всех проволок, установлен цифровой фотоаппарат, в данном случае Nikon с матрицей 6М пикселей (примерно 3000x2000). Фотоизображение проволок (рис. 3) снимается в сыром формате Nikon (NEF) и конвертируется с помощью программы dscraw в Portable PixMap. Далее оно импортируется в 2-мерную гистограмму ROOT [3], бины которой соответствуют пикселям матрицы, содержимое бина – яркость R+G+B. Для визуально выбранной линейки пикселей, проходящей перпендикулярно проволокам, строится график зависимости яркости от номера пикселя.

Стоит отметить, что данная модель фотоаппарата использует так называемый фильтр Байера. Каждый пиксель матрицы имеет один из цветов R,G или B в соответствии с некоторой регулярной схемой. Преобразование в цветное изображение RGB 3000x2000 делается внутри программы dscraw некоторой интерполяцией. Возможно, что прямая работа с исходным изображением с учётом структуры фильтра Байера может улучшить координатное разрешение.

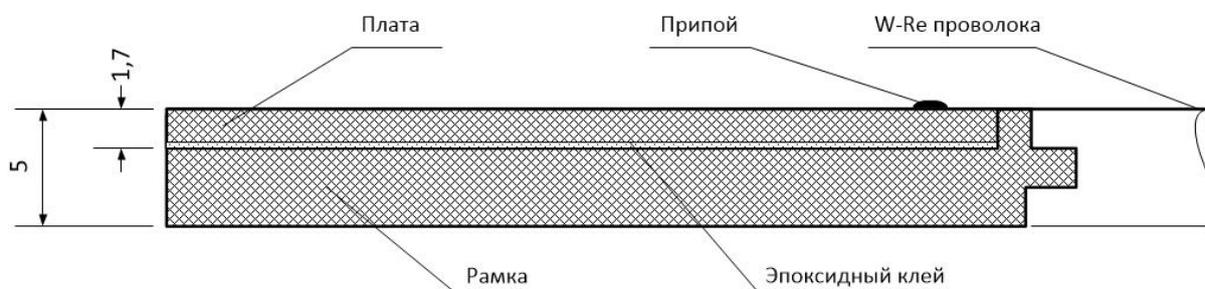


Рис. 2. Эскизное сечение узла крепления проволоки к сигнальной плате.

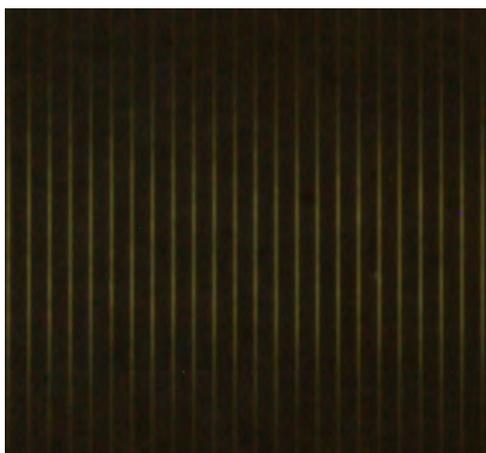


Рис. 3. Фрагмент фотографии натянутых проволок на фоне черной бумаги.

Положения проволок, видимых как пики с высокой яркостью на темном фоне, определяются автоматизированной подгонкой. Коэффициент преобразования пиксельной шкалы в единицы длины определяется по известному расстоянию между крайними проволоками. Предполагается, что в среднем шаг проволок равен номинальному (2 мм) и отсутствуют плавные искажения шага винтов и гребёнок. Это предположение оказывается адекватным для основной задачи контроля – выявления отдельных проволок со сбоем шага. Слабая нелинейность оптики фотоаппарата учитывается введением кубического полинома. Результат представляется в виде отклонений подгоночных положений от номинальных. При соблюдении технологии монтажа проволок среднеквадратичный разброс шага проволок составляет около 30 мкм, что сопоставимо с оценкой точности измерения. На рис. 4 приведен протокол измерений шага в одной из плоскостей после освобождения проволок.

Натяжение проволок увеличено до 75 г по сравнению со старой конструкцией камер с проволокой 20 мкм и натяжением 55 г по двум причинам. Во-первых, с увеличением диаметра проволоки требуется более высокое рабочее напряжение и, как следствие, большее натяжение для сохранения электростатической устойчивости. Во-вторых, увеличение в  $\sim 2$  раза жёсткости проволоки приводит к 2-кратному возрастанию вариаций натяжения из-за неконтролируемых деформаций рамки при сборке камеры.

Повышение натяжения и жёсткости проволоки привели к необходимости предварительной деформации более длинной рамки X перед запайкой проволок. Величина требуемой деформации, понимаемой как уменьшение расстояния между противоположными сторонами рамки в центре, составляет 0.45 мм. Она была определена полуэмпирическим путём на основе измерения натяжения проволок, запаянных без преддеформации рамки, а также приближённым расчетом. Деформация осуществлялась забиванием клина в центре одной из длинных сторон рамки, закреплённой на монтажном столе с упором в центре противоположной стороны.

Для выявления ненадёжных проволок и/или пайки использовалось их одновременное тестовое нагружение после монтажа с последующим измерением натяжения.

h\_9500

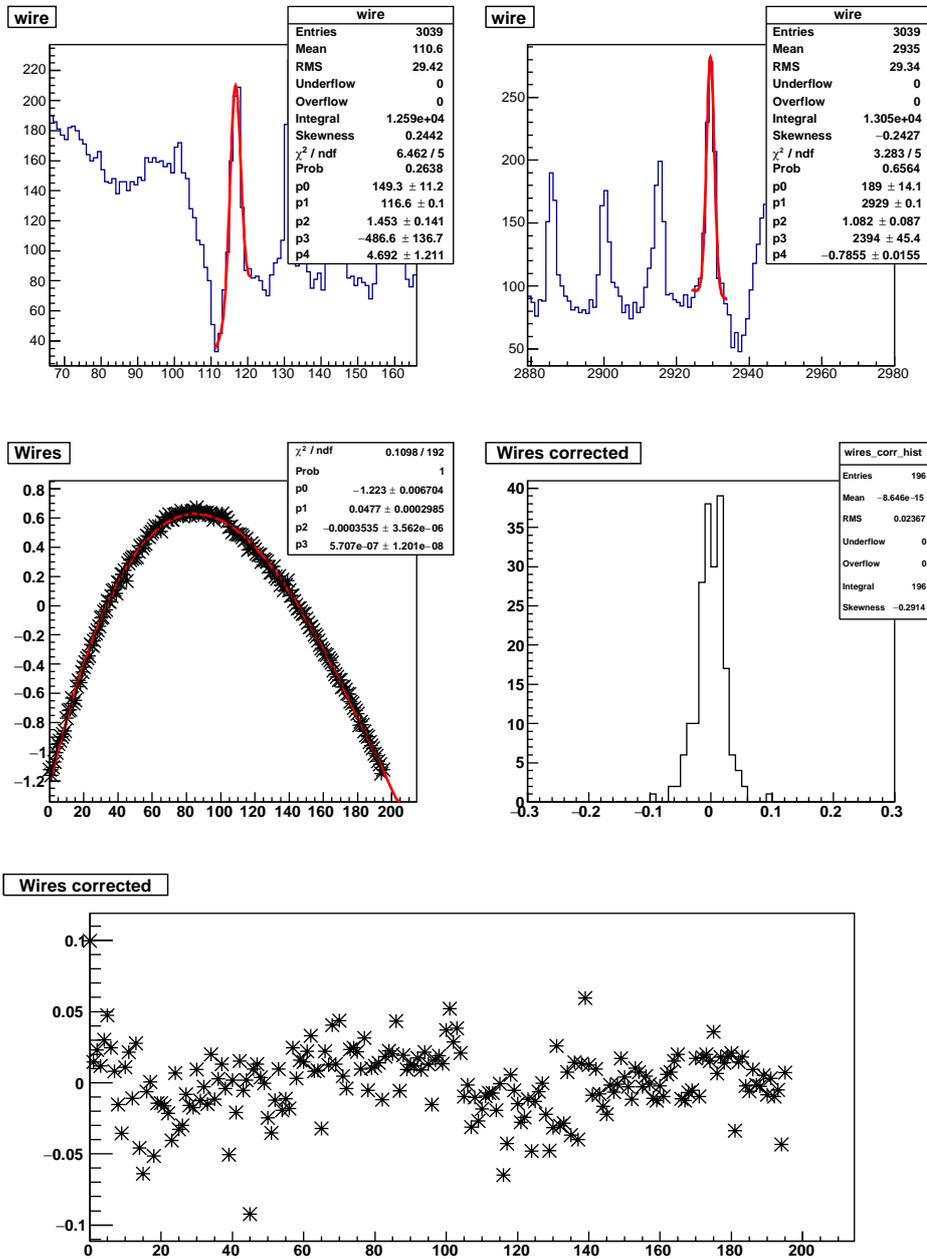


Рис. 4. Верхний ряд, слева и справа: нахождение положений крайних проволок по шкале пикселей. Средний ряд: слева – отклонения в мм (маркеры) проволок от номинальных положений согласно линейному преобразованию шкал и нахождение кубической поправки (непрерывная кривая); справа – гистограмма отклонений проволок от номинала с учётом поправки. Нижний ряд – график отклонений, видны две проволоки с отклонением 0.1 мм.

Нагружение осуществлялось путём опускания на центр проволок расчетного груза – пластиковой трубы диаметром около 3 см и длиной чуть больше рабочей ширины рамки, со свинцовыми навесками внутри.

Натяжение всех проволок по очереди измерялось прибором собственной разработки PCWTM (PC Wire Tension Meter). Он сделан на базе модуля TDC-96MWC [4] добавлением к нему подсоединяемой через 150-контактный разъём DIN платы расширения с генератором воздействия на проволоку, усилителем сигнала с проволоки и 12-битным АЦП MCP3208. Усилитель недифференциальный, сделан на ОУ TLV9101 по классической неинвертирующей схеме, имеет входное сопротивление 2 МОм, коэффициент усиления 100, полосу 7 кГц (дополнительно искусственно ограничена RC-цепью на выходе).

Под рамкой вблизи центра проволоки (группы проволок) помещается постоянный ферритовый магнит, в нашем случае в форме параллелепипеда размером около  $12 \times 8 \times 1$  см<sup>3</sup>, создающий поле с компонентой поперёк проволоки около 250 Гс. Прямоугольный импульс тока около 100 мА длительностью 10 мс возбуждает собственные колебания проволоки, после чего с неё регистрируется сигнал ЭДС индукции. Амплитуда сигнала на выходе усилителя – около 9 мВ (15 отсчётов АЦП). Оцифровка ведётся со скоростью 16 квыб/с, не более 9216 выборок на измерение (ограничивается внутренней памятью в ПЛИС TDC-96MWC, если не использовать DDR2 SDRAM).

Для решения проблемы сильной сетевой наводки с частотой 50 Гц и её гармониками, не синхронной с возбуждением, производились многократные (несколько десятков раз) измерения и последующее усреднение сигнала. Усреднённый сигнал подвергался дискретному преобразованию Фурье для получения спектра собственных колебаний проволоки, определению частоты основной гармоники и последующему пересчёту её в натяжение проволоки. Математическая обработка выполнялась в значительной степени автоматизировано с помощью специально разработанных программ. Число выборок на измерение и число измерений для усреднения было подобрано так чтобы длительность измерения составляла не более 10 с, что позволяет промерить рамку (до 288 проволок) за разумное время около 1 часа. На рис. 5 приведён типичный спектр, на рис. 6 — результат измерения натяжения на рамке Y.

Описанная технология обеспечила устойчивую работу камер при напряжении 3.2 кВ (см. Раздел 3). Расчётные запасы по электростатической устойчивости по напряжению составили фактор 1.8 для Y и фактор 2.8 для X (запасы по натяжению равны квадратам этих величин). Для более короткой и соответственно жёсткой ( $\approx 72$  г/мм) проволоки X запас увеличен, так как при равной деформации изменение её натяжения больше. Эти запасы оказались достаточными для парирования неконтролируемых деформаций рамок при сборке камер.

За время эксплуатации камер с проволокой 30 мкм (более 2 лет на момент написания работы) не произошло ни одного обрыва проволоки, характерного для старых камер с проволокой 20 мкм, что объясняется большей прочностью толстой проволоки и, вероятно, более высокой надёжностью относительно несовершенства их производства, в том числе отклонений диаметра от номинала. В целом переход на проволоку 30 мкм оказался оправданным, несмотря на усложнение технологии. Возможно, ком-

промисленный вариант в виде проволоки 25 мкм был бы ещё лучше по совокупности факторов: надёжности к обрывам проволоки, её умеренной жёсткости, умеренного роста рабочего напряжения при том же газовом усилении.

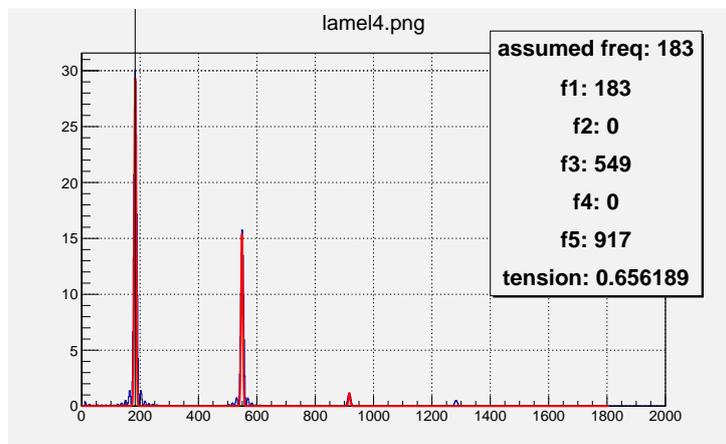


Рис. 5. Фурье-спектр (амплитуда в отн. единицах, частота в Гц) сигнала с проволоки камеры после импульсного возбуждения колебаний. Согласно граничным условиям, определяемым размещением магнита, эффективно возбуждаются нечетные гармоники.

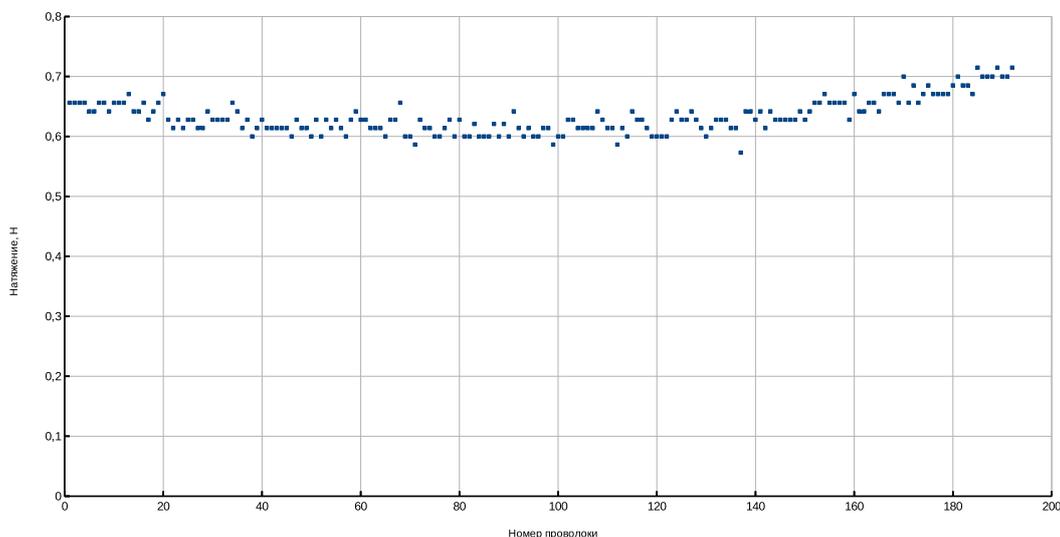


Рис. 6. Натяжение (в Н) проволок рамки Y после её освобождения. Виден прогиб в центре под действием натяжения. Некоторое снижение натяжения по краям рамки по сравнению с начальным 75 г связано с изгибом параллельных проволок сторон рамки вне её плоскости; при установке рамки в камеру этот изгиб устраняется.

### 3. Электроника ПК

Камеры установлены в дюралюминиевую (Д16) раму на платформе. Шаг их установки по направлению пучка составляет 115 мм при суммарной толщине корпуса камеры в 50 мм, что накладывает довольно жёсткие ограничения на габариты и схему размещения электроники. Конструкция рамы с пятью посадочными местами обеспечивает довольно простую установку и выемку камер, их фиксацию и электрический контакт корпусов с платформой. Платформа в рабочем положении придвинута к полюсам магнита, так что РС 40 × 60 находятся в области поля до 0.5 Тл. После установки на два торца корпуса камеры, свободные от высоковольтных разъемов и газовых штуцеров, устанавливаются комплекты накамерной электроники собственной разработки. Они выполняют все функции, от усиления сигналов до передачи отформатированных данных в систему сбора данных (ССД) ВЕС [5].

Комплект на 96 каналов базируется на дюралюминиевой струбцине с винтовыми зажимами. Струбцина обеспечивает позиционирование комплекта относительно СП ПК, механически устойчивое крепление и надежный электрический контакт цепей заземления с корпусом ПК. На струбцине без использования кабельных соединений смонтированы в четыре «этажа» платы (модули) 4-х типов (рис. 9).

Пассивная переходная плата ПП-1 с 3-мя соединителями РС1е x4 передает сигналы с ламелей СП на шесть усилителей-формирователей (УФ). Усилитель на 16 каналов изготовлен на основе двух 8-канальных интегральных схем (ИС) ОКА-2ВС [6]. Эта ИС является развитием ИС ОКА-1, исходно разработанной для эксперимента ОКА [7]. Принципиальная схема приведена на рис. 7, для упрощения показан один канал. На входах усилителя установлены двухкаскадные защитные цепи от пробоев в камере. Первым каскадом является включённая между входом и «землёй» встречно-параллельная диодная пара BAV99W (VD1), далее установлены балластный SMD-резистор R4 типоразмера 0805 и BAV99W (VD2) на «землю». Опыт эксплуатации показал, что прямое подключение диодов BAV99W на вход надёжно работает. В случае же установки балластного резистора прямо на входе, для облегчения режима работы диодов первого каскада во время пробоя, этот резистор быстро — в течение нескольких суток работы на пучке — выходит из строя<sup>3</sup>. ИС ОКА-2ВС формирует парафазные выходные сигналы в уровнях LVDS длительностью 90 нс.

ИС имеет тестовый вход (вывод 34 ИС U1) для формирования встроенного сигнала типа дельта-функции, однако в представленном усилителе он не используется. Вместо этого широкий (~ 100 нс) прямоугольный испытательный импульс с регулируемой амплитудой до 5 мкА (на входе усилителя) подается непосредственно на все входы ИС. Широкий импульс ближе к форме сигнала с камеры и позволяет измерить реальные пороги каналов усилителя в составе собранного комплекта ПП-1 – усилитель – ПП-2 – ВЦП (см. далее).

Усилитель имеет индивидуальную для каждой ИС регулировку порога срабаты-

---

<sup>3</sup>Возможно использование специально оптимизированных для больших импульсных токов резисторов. Такой вариант используется в усилителях для дрейфовых трубок ВЕС в течение более 10 лет без поломок.

вания (вывод 30 ИС U1).

Печатная плата усилителя спроектирована так, что входной и выходной соединители могут монтироваться с обеих сторон платы на выбор, с отражением соответствия «номер канала – контакт соединителя», перестановкой двух сигналов управления порогами и инверсией полярности LVDS на выходе. При этом меняются местами контакты питания и управления амплитудой тестового импульса, соответствующие изменения электрической схемы осуществляются установкой перемычек (на рис.7 не показаны). Для предотвращения сгорания нагрузочного резистора R16 при ошибочном использовании модифицированного усилителя как «нормального», в цепь управления амплитудой добавлен последовательный резистор R15.

Переходная плата ПП-2 соединяет УФ с модулем время-цифрового преобразователя (ВЦП) TDC-96MWC [4]. На ПП-2 расположены дифференциальные приёмники 2-фазных сигналов LVDS от усилителей – преобразователи в 1-фазные сигналы уровня 3.3 В для TDC-96MWC, цепь подачи питания на усилитель, схемы управления порогами усилителей и амплитудой общего для 6-ти усилителей испытательного импульса. Питание номиналом +4.25 В от импульсного преобразователя в составе TDC-96MWC через ПП-2 поступает на дополнительный линейный LDO стабилизатор (U3) на 3.3 В в усилителе. На усилителе опционально можно установить последовательные дроссели L1, L2 в цепи «земли» и питания (на РС 40 × 60 не используются) для уменьшения паразитных земляных токов. На случай значительного активного сопротивления дросселей интерфейс подсоединения усилителя к ПП-2 допускает разность потенциалов до 0.3 В между их «землями». С этой целью для задания порогов и амплитуды испытательного импульса используется токовое (аналоговое) управление с биполярными транзисторами с открытым коллектором на ПП-2 (рис. 8), испытательный импульс подаётся дифференциальным сигналом. Для цифровой регулировки порогов и амплитуды служат семь 8-битных 2-канальных ЦАП MCP48FVB02 (задействовано всего 13 каналов), управляемых от TDC-96MWC через линии GPIO. Модуль TDC-96MWC оцифровывает сигналы, форматирует данные одного события, накапливает их за время сброса частиц из ускорителя и далее передает в ССД.

Платы УФ и ПП-2 четырёхслойные со сплошным внутренним слоем «земли». Цепи «земли» TDC-96MWC, ПП-2, УФ и ПП-1 соединены напрямую, «земля» ПП-1 контактирует со струбциной на максимально большой площади. Струбцины имеют электрический контакт с корпусом камеры посредством 4-х прижимных болтов М5, затягиваемых при установке комплекта на камеру.

Комплект снабжен заземленными на струбцину кожухами, экранирующими УФ и ВЦП друг от друга и от окружения. Он связан с внешним оборудованием через один разъем USB3 (тип B) модуля TDC-96MWC с нестандартной комбинацией функций, детали описаны в [4]. Это кратно уменьшает количество кабельных соединений в системе.

Система РС 40 × 60 содержит 25 комплектов накамерной электроники, по 3 на каждую X плоскость и по 2 – на Y. Для их обслуживания служат модули собственной разработки TNPD-24 (Trigger, Network and Power Distributor, рис. 10), шириной в стандартную 19-дюймовую стойку и высотой 1U. Один модуль обеспечивает до

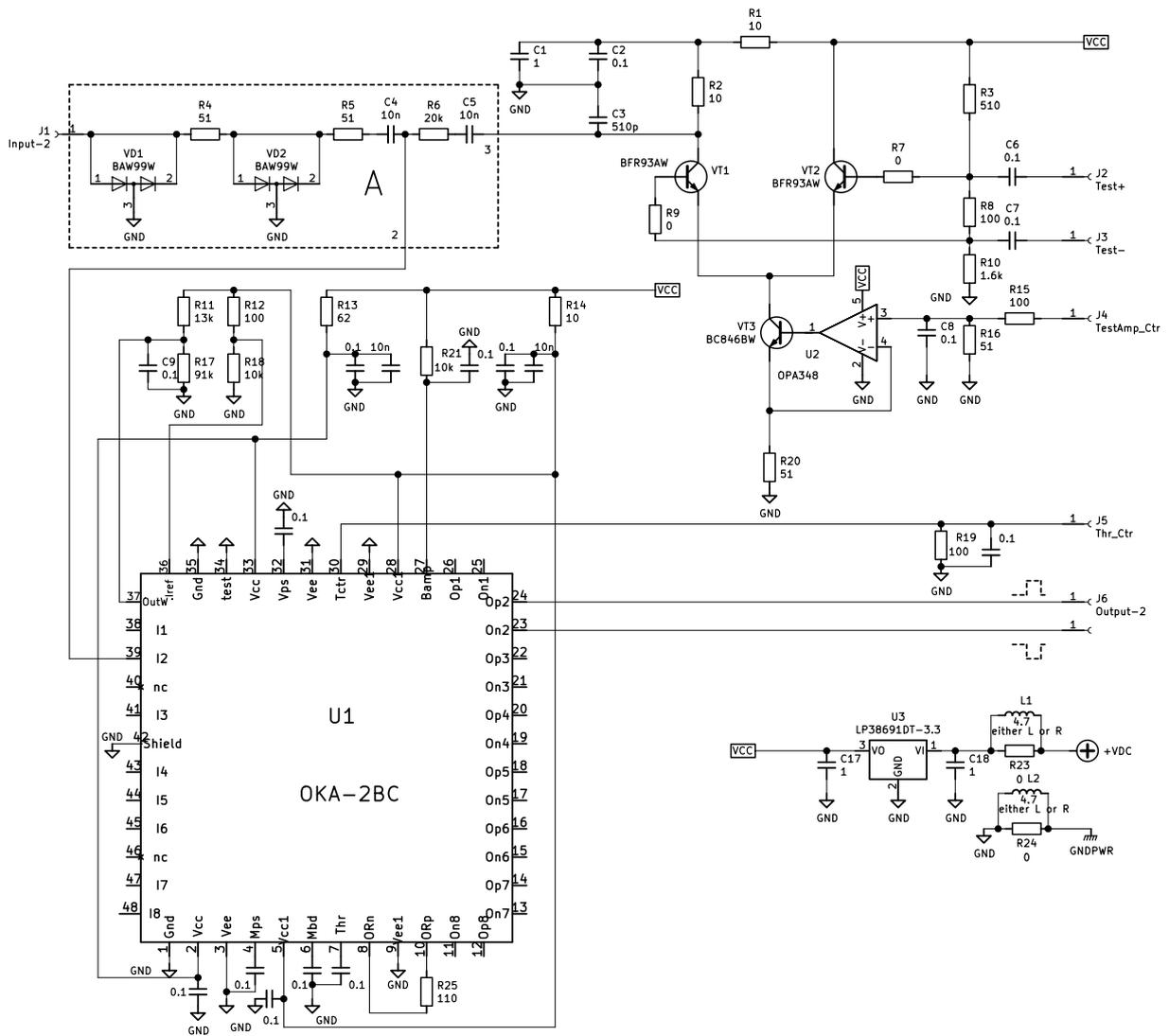


Рис. 7. Упрощенная схема 16-канального усилителя. Показана одна из двух ИС ОКА-2ВС с входной (обозначена как блок А) и выходной цепями для её одного канала. Схема формирования тестового импульса общая для всех каналов, за исключением индивидуальных для каждого канала цепей преобразования напряжения в ток (резистор R6, конденсатор C5).

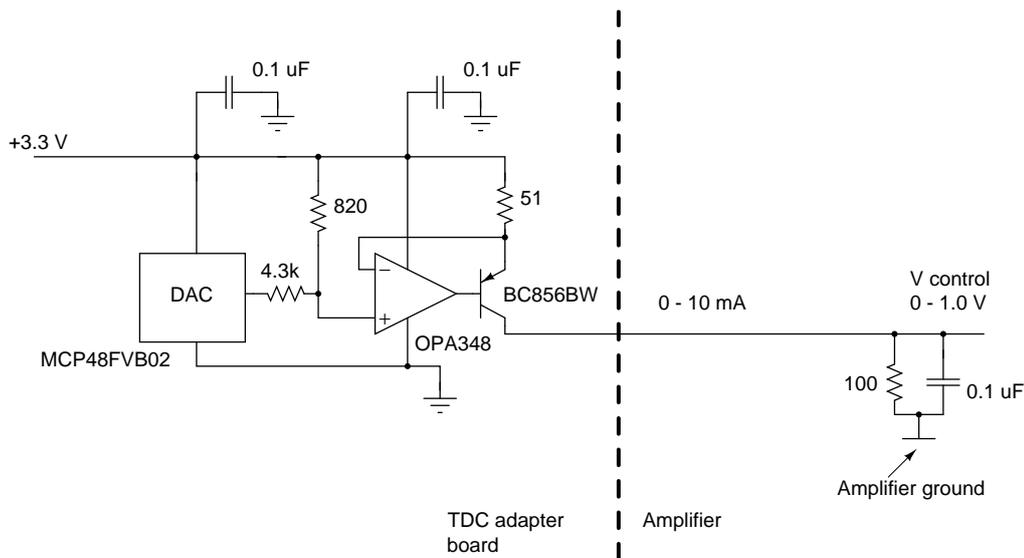


Рис. 8. Схема управления порогом. Схема управления амплитудой тестового импульса аналогична.

12-ти комплектов камерной электроники питанием, сигналами триггерной системы *GATE* и *START*, сетью Ethernet между TDC-96MWC и стандартным коммуникационным оборудованием Ethernet. В качестве такового используется коммутатор Dlink DES-1026 с 24 портами 100BASE-TX для модулей и 2 портами 1000BASE-T, один из которых используется для подключения к ССД. Модули TNPД-24 (3 шт.) и коммутаторы DES-1026 (2 шт) смонтированы снизу платформы ПК на её выступающей из спектрометрической магнита части (рис. 11), расчётное магнитное поле в этой области не превышает 0.02 Тл. Сигналы *GATE* и *START* поступают на один из TNPД-24 из домика с триггерной электроникой по двум коаксиальным кабелям. Остальные TNPД-24 подключаются к первому по цепочке с использованием специального выхода с комбинированным сигналом *GATE* + *START*. Здесь для *GATE* используются уровни NIM, для *START* — типа NIM с увеличенной в 2 раза амплитудой для обеспечения хорошей крутизны фронта в области порога приёмника с учетом затухания сигнала в кабеле. Для питания системы используются 3 дешёвых промышленных импульсных источника питания Meanwell с напряжением +12 В, которые располагаются поблизости примерно в 2 метрах от TNPД-24. Суммарный ток на  $\approx 2.5$  тысяч каналов электроники составляет около 25 А. На питающие кабели от импульсных ИП и на кабели USB3 надеты ферритовые фильтры для блокирования высокочастотных синфазных токов.

Камеры с электроникой являются распределенной системой с плотно скомпонованными широкополосными чувствительными усилителями и быстрыми цифровыми схемами, которая к тому же размещена в зале с мощным и/или высокочастотным оборудованием. Представленная система оказалась чувствительна к качеству электрического контакта между корпусами камер камер и узлами опорной конструкции.

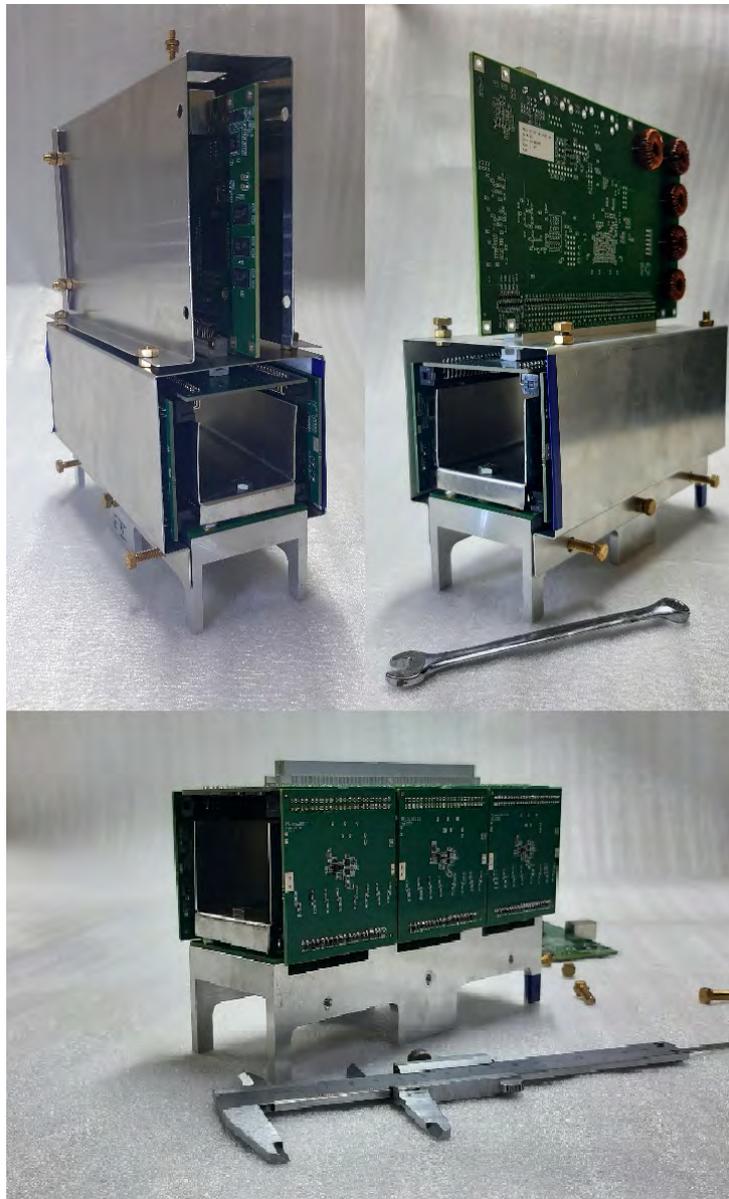


Рис. 9. Комплект камерной электроники в нескольких видах. Слева сверху – в собранном виде для установки на камеру; видны струбцина в основании, торцы плат 4-х типов, три П-образных экрана – верхний, нижний и внутренний. Справа сверху – со снятым верхним экраном; хорошо видна плата TDC-96MWC с силовыми индуктивностями импульсных преобразователей. Внизу – с дополнительно снятым нижним экраном; хорошо видны три усилителя одного ряда.

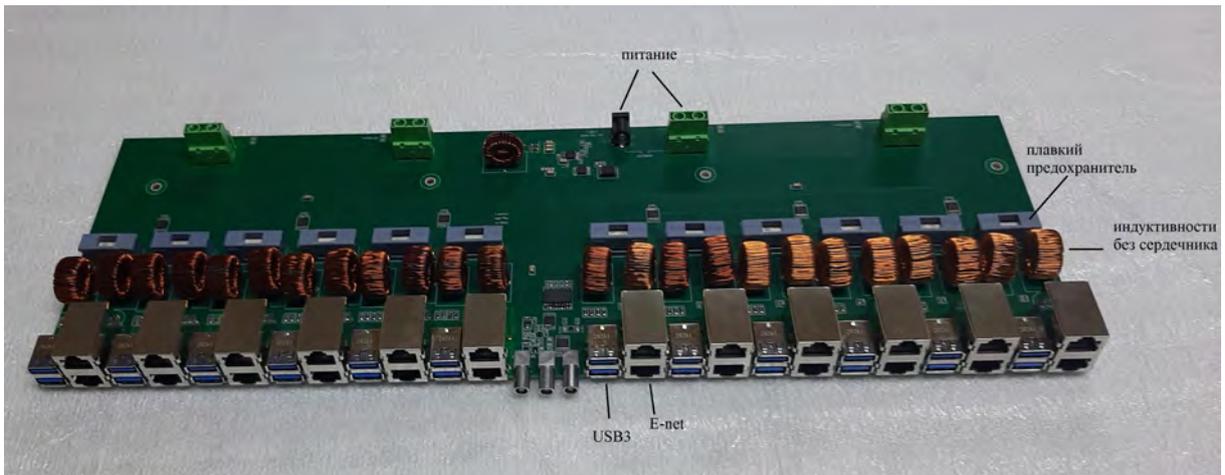


Рис. 10. Модуль TNPД-24.

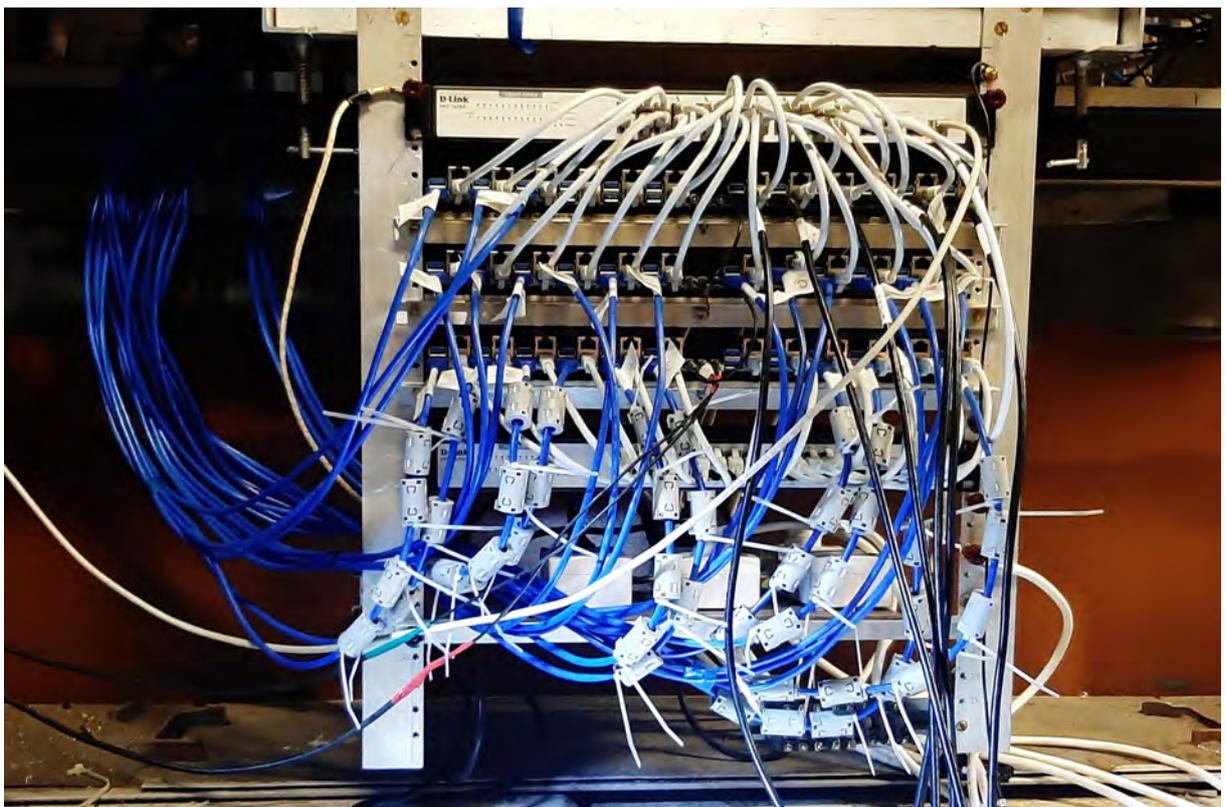


Рис. 11. Подвесная рама с оборудованием для ПК (сверху вниз): коммутатор Dlink, три модуля TNPД-24, второй Dlink. Синие кабели с ферритами – USB3 от TDC-96MWC, белые – E-net. В правом нижнем углу видны белые кабели от внешних ИП.

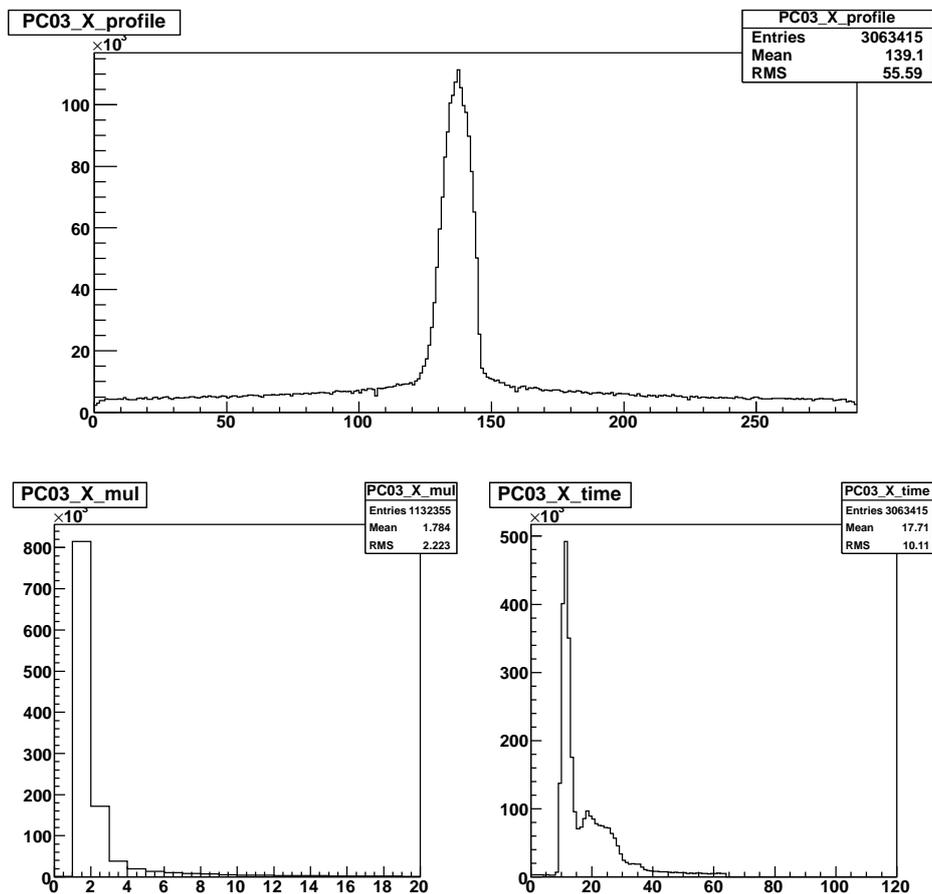


Рис. 12. Распределения для событий, зарегистрированных в одной из плоскостей камер РС  $40 \times 60$ : сверху – по номерам сработавших каналов («профиль засветки»), внизу слева – по множественности срабатываний, внизу справа – по времени срабатываний в отсчётах ВЦП (5 нс). Условия набора: пионный пучок с импульсом 29 ГэВ/с и интенсивностью около  $10^5/\text{с}$ , триггер на пучок с использованием счётчиков до мишени, перед системой камер мишень Ве длиной 40 мм.

Указанные выше меры против помех и возбуждений – заземление, экранирование, фильтры, индуктивные развязки в цепях питания TDC-96MWC и TNPD – были выработаны полуэмпирическим путем, без расчетов на электромагнитную совместимость (ЭМС). Они обеспечили работу камер со смесью аргон – диметоксиметан (метилаль) в объёмной пропорции 3:1 на напряжении 3.2 кВ с эффективностью не ниже 95% при установке порога УФ около 4 мкА на прямоугольном импульсе шириной 70 нс. На рис. 12 показаны распределения, демонстрирующие работу камер в пучковой экспозиции. Порог 4 мкА является весьма высоким для газовых детекторов типа пропорциональных камер. Понижение порога вплоть до уровня  $\sim 1$  мкА не вызывает типичного для систем предыдущего поколения самовозбуждения за счёт прямой обратной связи с выхода усилителей на вход, но приводит к неприемлемому уровню шумов (помех). Источником проблемы, вероятно, являются помехи от импульсных преобразователей в TDC-96MWC и 100-мегабитного Ethernet. Системного изучения влияния этих факторов не проводилось. Можно отметить, что подобному исследованию в представленной системе способствуют удалённый контроль порогов 8-канальных групп и радикальное снижение числа кабелей. Устойчивость к коллективному самовозбуждению позволяет количественно оценивать по уровню шумов эффект от принятия тех или иных мер.

#### 4. Заключение

Модернизация системы РС 40 × 60 с сохранением основного конструктива позволила продолжить её эксплуатацию в составе ВЕС без изменения конфигурации спектрометра.

В результате модернизации улучшены большинство технических и эксплуатационных характеристик: повышены надежность и ремонтпригодность камер; повышена стабильность их работы; облегчено обслуживание; уменьшено мертвое время электроники; расширены возможности ее конфигурирования, настройки и диагностики. Недостатком является повышенный уровень электрических помех в системе, который не позволил понизить порог усилителей ниже 4 мкА. Это оказалось приемлемым с точки зрения функционирования установки ВЕС как инструмента для физики частиц. Однако в других ситуациях при проектировании подобных систем могут потребоваться исследования вопросов ЭМС.

Авторы благодарят И.Ю. Смотрову за участие в монтаже ПК, В.Н. Гущина за участие в их испытаниях.

#### Список литературы

- [1] Г.В. Борисов и др.: Трековая система установки ВЕС. Препринт ИФВЭ 98-60, Протвино (1998). <http://web.ihep.su/library/pubs/rep1998/ps/98-60.pdf>
- [2] В.А. Викторов, С.В. Головкин. Препринт ИФВЭ 83-16, Серпухов (1983)

- [3] Rene Brun and Fons Rademakers, ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework, Proceedings AНЕНP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A 389 (1997) 81-86.
- [4] А.В. Ивашин, В.Д. Матвеев, Ю.А. Хохлов. Электронный модуль обработки сигналов TDC-96MWC и его использование на установке ВЕС. Препринт ИФВЭ 2024-1, Протвино (2024). <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2024/ps/2024-1.pdf>
- [5] А.В. Ивашин, В.Д. Матвеев, Ю.А. Хохлов: Модернизированная система сбора данных установки ВЕС. Технические аспекты. Препринт ИФВЭ 2010-10, Протвино (2010). <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2010/ps/2010-10.pdf>
- [6] А.В. Солин, частное сообщение.
- [7] С.А. Акименко, В.Н. Болотов, Ю.В. Гилицкий и др.: Исследование пучкового спектрометра установки «ОКА». Препринт ИФВЭ 2008-28, Протвино (2008). <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2008/ps/2008-28.pdf>

*Рукопись поступила 19 февраля 2024 г.*

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Д.Р. Еремеев, А.В. Ивашин, В.Д. Матвеев, Е.В. Назаров, Ю.А. Хохлов,  
Е.В. Чернов, А.А. Шумаков.

Модернизированные пропорциональные камеры установки ВЕС.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X**.

---

Подписано к печати 21.02.2024 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.  
Печ.л. 1,4. Уч.-изд.л. 1,8. Тираж 60. Заказ 2. Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ  
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

[www.ihep.ru](http://www.ihep.ru); библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

П Р Е П Р И Н Т 2024–3,  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2024

---