

## Отдел радиоэлектроники – история жизни и деятельности

В.Л. Головцов

### 1. Создание отдела. Начало пути



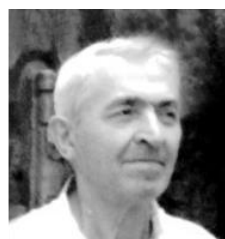
А.А. Воробьев



И. И. Ткач



В. Т. Грачев



А.Н. Кознов

Началом отсчета существования отдела радиоэлектроники официально считается январь 1971 года. К тому времени свершилась основополагающая череда событий: в 1967 году был произведен физический запуск синхроциклотрона – ускорителя протонов до энергии 1 ГэВ, а в 1970 году – вывод пучка в экспериментальный зал. В экспериментальном зале при сравнительно удовлетворительном состоянии детекторной части предстояло в короткие сроки создать приборную базу, разработать и изготовить прикладную электронику, приобрести необходимую вычислительную технику и т.д. Неизбежный исторический вопрос «Что делать?» со всеми его частностями стал перед молодыми руководителями А.А. Воробьевым и А.В. Куликовым. Напряженные многочасовые дискуссии, заседания Ученого совета и иных руководящих органов привели к естественному решению – созданию отдела радиоэлектроники (ОРЭ). Руководителем отдела был назначен А.С. Денисов. Структуру отдела составили служба автоматизации сбора и накопления экспериментальных данных – руководитель И.И.Ткач, группа физической электроники – руководитель Э.М. Спириденков, группа наносекундной электроники – руководитель В.Т. Грачев, вычислительный центр – руководитель В.А. Щегельский, опытное производство – руководитель А.Н. Кознов, группа измерительного и экспериментального



А.С. Денисов  
Заведующий ОРЭ  
1971-1978



Э.М. Спириденков



В.А. Щегельский



В.Д. Малахов

залов – руководитель В. Д. Малахов. Первоначально располагавшийся в помещениях 7-го корпуса отдел весной 1973 года переехал во вновь построенную в рекордно короткие сроки пристройку 2-го корпуса, с тех пор именуемую пристройкой ОРЭ. К тому времени группы разработчиков были заняты созданием электроники для экспериментов с ионизационной камерой ИКАР, магнитным анализатором протонов (МАП), нейтронным спектрометром и другими детекторами. Молодые специалисты А.П. Кашук и Н.К. Ласточкин при участии В.С. Самсоненкова и В.Н. Антифеева под руководством И. И. Ткача разработали и изготовили систему обработки и накопления информации с искровых камер

(СОНИК). В системе использовались магнестрикционные ультразвуковые линии задержки, а в качестве носителя информации – кольца из проволоки. Система была соединена в линию с ЭВМ «Минск-22», над чем потрудился дружный коллектив, возглавляемый А.В. Денисовой. В результате появилась и начала функционировать первая система сбора данных экспериментов на ускорителе. Активно включилась в работу группа измерительного зала (В.Д. Малахов, А.Г. Куликов, В.И. Голубев). В короткие сроки в залах появились стандартизованное кабельное хозяйство, стойки высоковольтного питания общего пользования, измерительные приборы и системы. Для «быстрой» электроники использовался доморощенный стандарт «Вишня» - аналог стандарта NIM - Nuclear Instrumentation Module. Принятый в 1969 году стандарт NIM представил общие правила устройства электронных модулей, таких как усилители, цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи, фильтры и т.д., устанавливаемые в крейт NIM. Появились выносные измерительные станции (ВИСТ), реализованные из набора модулей, установленных в крейтах «Вишня».

Дальнейшее развитие требовало новых технологий проектирования и производства электроники на современной для того времени и доступной элементной базе. Началось освоение стандарта КАМАК (англ. САМАС - Computer Automated Measurement and



Б.В. Бочин

Control), определяющего организацию магистрально-модульной шины для связи измерительных устройств с цифровой аппаратурой обработки информации в системах сбора данных. Отдел столкнулся с рядом проблем, таких как отсутствие коммерчески доступных крейтов КАМАК, источников питания и серийных модулей

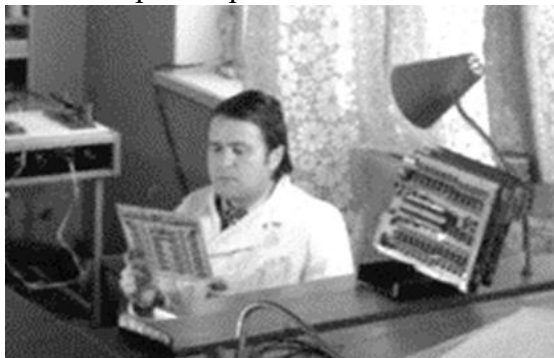
к ним, а производство своих модулей КАМАК требовало соответствующей технологической базы. Были предприняты энергичные усилия по освоению приемлемой технологии производства двухслойных печатных плат, приобретено необходимое оборудование - травильные и копировальные



Аппликация печатных плат.

Н.И. Рогозина

машины, сверлильные станки, оборудован монтажный участок (А.Н.Кознов, Б.В. Бочин), а на этапе проектирования печатных плат освоен метод аппликации. В результате был налажен серийный выпуск модулей с производительностью до 7 изделий в неделю. В перечне изделий КАМАК появилась линейка модулей общего применения – разработчики И.И. Ткач, Е.Г. Кормин, Г. А. Городницкий, С.И. Калентарова, Н.Я. Архипова. Линейка модулей предназначалась для регистрации цифровой информации, управления, связи систем с аппаратурой, выполненной не в стандарте КАМАК. Для эксперимента



Монтажный участок. В.Н. Антифеев

«Рассеяние мюонов на поляризованной мишени» был разработан модуль запуска считывающей электроники искровых камер (Н.Ф. Бондарь). Развивалась линейка модулей наносекундного быстродействия – программно управляемые формирователи сигналов

(А.С. Денисов, Н.Ф. Бондарь, С.С. Волков). В стандарте КАМАК была выполнена автоматизированная система логического отбора сигналов сцинтилляционных детекторов (С.С. Волков, Е.Г. Кормин).

Развивалась компьютерная база: к концу 1974 года была получена первая ЭВМ серии ЕС1020, имевшая 8-битный процессор, память 64 кБ, дисковую операционную систему (ДОС) и магнитные ленты. Запуск машины и соединение её в линию с ЭВМ «Минск-22», проведенные усилиями П.В. Неустроева, Б.В. Бочина, А.В. Денисовой, позволили



Группа сотрудников, проводивших работы по отладке и запуску ЭВМ и системного оборудования.

Сидят П.В. Неустроев, А.Ф. Мышинский.

Стоят Н.И. Окунев, Ф.Е. Шевель, А.В. Денисова,  
Б.В. Бочин, В.А. Сумар

принимать данные экспериментов на современные магнитные ленты ЕС1020. К концу 1975 года был разработан и подсоединен к мультиплексному каналу ЕС1020 связной контроллер Л330, что позволило подключать к машине до 16 удаленных абонентов. Тогда же был введен в строй дисплей Л820, созданный по разработке П.В. Неустроева, В.И. Семенихина и Б.В. Бочина. Группа программистов - А.Е. Шевель, Т. С. Сереброва, И.И. Грачева и др. модифицировала систему ДОС, что позволило адаптировать её для работы с активными устройствами, а написанная теми же авторами диалоговая система Луга, использовавшая дисплей Л820, позволила принимать данные в режиме диалога.

## 2. Эксперименты с ионизационным спектрометром ИКАР. Дальнейшее развитие.



Разработчики электроники амплитудных измерений импульсов ИКАР Г.Е. Петров, А.В. Надточий, М.Н. Язиков, Э.М. Спириденков

Значительные разработки электроники были выполнены для экспериментов по измерению упругого рассеяния адронов на малые углы (руководитель А.А. Воробьев). В экспериментальной установке использовались импульсная ионизационная камера адронного рассеяния (ИКАР), являющаяся одновременно газовой мишенью и детектором ядер отдачи, и магнитный спектрометр – установка пропорциональных камер для регистрации рассеянной частицы. Измерения были проведены как на синхроциклотроне в Гатчине, так и на ускорителях Серпухова и ЦЕРН (эксперимент WA9). Электронику амплитудных измерений импульсов катода и анода камеры ИКАР разрабатывали А.В.Надточий, Г.Е. Петров, М.И. Язиков,

Н.А. Тимофеев под руководством Э.М. Спириденкова. Для избирательного запуска

относительно более медленного спектрометра ядер отдачи на пучках с интенсивностью  $\sim 10^6$  1/сек был разработан и изготовлен специализированный процессор (SDPU),



Демонстрация процессора SDPU перед отправкой в ЦЕРН.

А.А. Воробьев, А.П. Кащук  
Ю.А. Антонов

режектирующий события с углом рассеяния менее заданного порогового значения. Такой режим избирательного запуска в 100 раз снижал частоту запусков ионизационной камеры. В спецпроцессоре были применены современные микросхемы эмиттерно-связанной логики серии MECL 10000, быстрдействие которых в совокупности с минимизацией переключательных функций выработки решения позволили получить быстрдействие (комбинационную задержку) спецпроцессора 120 нс и «мертвое» время системы триггера в эксперименте 250 нс. Разработка процессора была выполнена в службе И.И. Ткача группой А.П. Кащука с участием В.Л. Головцова,

Л.Г.Кудина, Э.И.Малютенкова, Т.Г. Макаева, В.Н. Слюсаря и др. Как следующая итерация спецпроцессора SDPU, уже успешно работавшего в ЦЕРН, в группе Э.М. Спириденкова был разработан модернизированный спецпроцессор для избирательного запуска

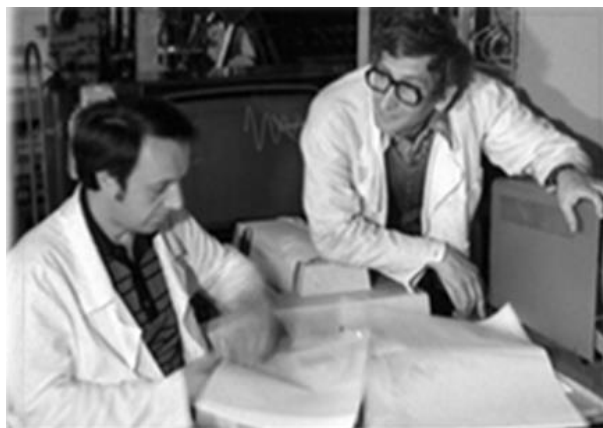


П.В. Неустроев  
Заведующий ОРЭ  
1979-1986

спектрометра ИКАР в экспериментах по изучению возможных дибарионных резонансов на синхроциклотроне ПИЯФ. Квинтэссенцией модернизации явилась заглавная идея промежуточного кодирования информации пропорциональных камер до схем совпадений, конвейерный принцип обработки событий с дискретностью 50 нс и уточненная аппроксимация телесного угла рассеяния. Как результат, было значительно ( $\sim$  в 3 раза) сокращено оборудование, получено практически нулевое «мертвое» время и существенно повышен коэффициент режекции нерассеянных частиц. В разработке, изготовлении, тестировании и эксплуатации спецпроцессора приняли участие А.Г. Атаманчук, В.Л. Головцов,

Э.М. Спириденков, Ю.А. Антонов, А.А. Князев и др.

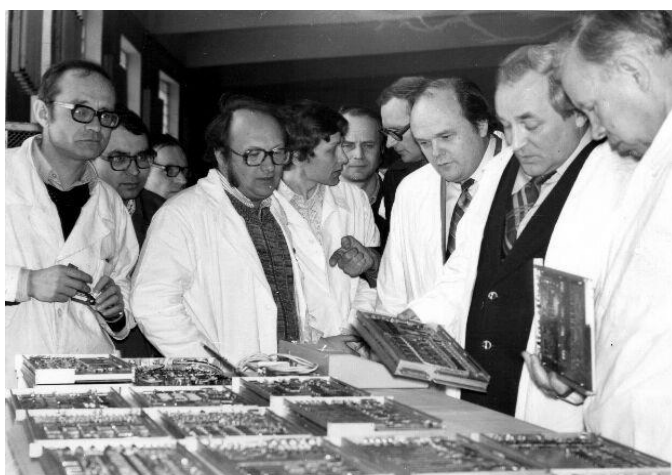
В связи с подготовкой эксперимента WA9 были выделены некоторые инвалютные средства, позволившие приобрести



Е. М. Орищин, А.Г. Атаманчук

современное по тем временам оборудование: компьютер PDP11-40, драйвер ветви BD011, 12 крейтов КАМАК Boreg с крейт-контроллерами A1 и источниками питания. Приобретенное оборудование в кратчайшие сроки было освоено и после создания необходимого программного обеспечения позволило перевести ряд текущих экспериментов на КАМАК (А.Г. Атаманчук, Е.М Орищин). Были организованы крейты общего пользования, оборудованные контроллерами A1, подключенными к компьютеру PDP11. Вскоре

PDP11 через прямой крейт была соединена с контроллером ЛЗ30 и получила соответственно прямой выход на ЕС1020 для передачи накопленных данных. Через некоторое время были приобретены отечественные мини ЭВМ СМЗ, СМ4 и соответственно возросшему парку компьютеров были организованы группа эксплуатации мини ЭВМ – руководитель А.Г. Атаманчук и группа программирования – руководитель Е.М. Оришин. К этому времени в отделе было произведено достаточное количество модулей КАМАК общего назначения – счетчики, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, преобразователи время-код программно-управляемые формирователи сигналов, сервисные модули и т.д. Разработки выполнили специалисты высокого класса Л.Н. Уваров, Н.Ф.



Демонстрация модулей КАМАК, разработанных и изготовленных в ОРЭ.

На переднем плане:

Э.М. Спириденков, П.В. Неустроев,  
Е.П. Велихов, А.А. Воробьев

Бондарь, С.С. Волков, Л.Г. Кудин, В.А. Снаррь, Н.А. Тимофеев. Эти разработки существенно расширили обеспечение экспериментов на синхроциклотроне современной для того времени электроникой. Для обеспечения обслуживания парка модулей и их использования в экспериментах на синхроциклотроне был организован ПУЛ, который возглавил Л.Г. Кудин.

Успехи в разработке, производстве и внедрении устройств систем сбора данных в ПИЯФ и в том числе – в ОРЭ были оценены присуждением в 1985 г. руководителям трех электронных подразделений П.В. Неустроеву, В.И. Кадашевичу и Ю.Ф. Рябову Премии

Совета Министров СССР «За разработку на основе международного стандарта КАМАК и организацию производства аппаратуры для создания систем автоматизации научных и научно-технических исследований».



Очередной номер стенгазеты «ОРЭШЕК»

Жизнь отдела не ограничивалась сугубо производственной и связанной с ней организационной деятельностью. Свою позитивную роль играло неформальное общение с его раскованностью, доброжелательной атмосферой, творческой активностью, появлением новых идей. В живом общении молодых многосторонне развитых людей проходили сражения шахматных блицтурниров, работала не вполне стандартная стенгазета ОРЭШЕК, где юмор присутствовал не только в соответствующей рубрике.

Повышенным спросом пользовалась рубрика «Сыч Силыч Сеятель сообщает», где собирательный образ мыслителя, внешне напоминавший Козьму Прутков, оперативно откликался на животрепещущие темы текущего бытия. Как-то в парткоме редактора

стенгазеты при случае спросили: «Что это у вас там за недорезанная газета? Сил Силыч какой-то ...». И по-отечески слегка пожурив, а затем и пошутив, перешли на другую тему... Весьма популярны в институте были новогодние вечера ОРЭ. Так сложилось, что в одном и том же месте в одно и то же время собрался коллектив, способный «в буднях великих строек» успевать выдумывать, творить и реализовывать неизменно интересные программы. Конечно, не все получалось одинаково удачно, но один номер всегда имел знаковый успех – выступление цыганского ансамбля с его знаменитой «Величальной» ...

### **3. Эксперименты E715, E761, E781, D0 на ускорителях Национальной Лаборатории им. Ферми (ФНАЛ).**

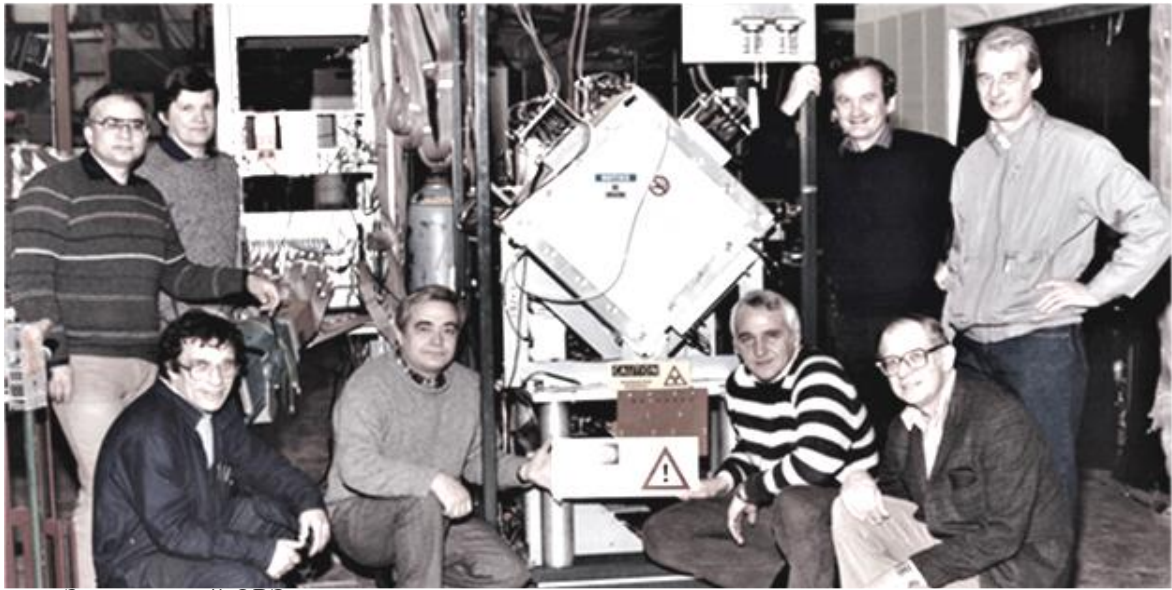
В начале 1980-х годов ПИЯФ (в те годы ЛИЯФ) по инициативе директора ОФВЭ А.А. Воробьева начал сотрудничать с ФНАЛ. Подготовка экспериментов E715 (1983), E761(1990) и E781(1997) на ускорителе Теватрон положила начало новому этапу в деятельности ОФВЭ (тогда – ЛФВЭ) и в том числе инициировала новый этап разработок электроники в ОРЭ. Для эксперимента E715 по изучению бета-распадов сигма-гиперонов ( $\Sigma^- \rightarrow ne\nu$ ) в ОФВЭ был разработан и изготовлен уникальный детектор переходного излучения. Детектор состоял из двенадцати независимых секций, каждая из которых включала многослойный пленочный радиатор и дрейфовую камеру для регистрации фотонов. Детектор был оснащен разработанной в ОРЭ придетекторной электроникой на основе гибридных микросхем (Н.Ф. Бондарь). Запуск и обслуживание электроники в эксперименте E715 осуществляли А.С. Денисов, И.И. Ткач и В.Т. Грачев. Эксперимент был выполнен столь успешно, что заслужил самые высокие оценки в научных кругах и послужил надежной основой для подготовки следующих экспериментов.

Эксперимент E761 был посвящен исследованию  $\Sigma^-$  - и  $\Xi^-$  - гиперонов на пучке протонов 800 GeV/c. В этом эксперименте помимо детектора переходного излучения ПИЯФ был представлен установкой многопроволочных пропорциональных камер (МПК).

Для регистрации и сбора данных с МПК в ОРЭ была разработана система CROS (Chamber Readout System), высокая эффективность работы которой достигалась следующим набором особенностей:

- применением специально разработанной микросхемы усилителя-дискриминатора повышенного быстродействия на основе гибридной технологии;
- использованием цифровой памяти в качестве программно-управляемой задержки, при этом мертвое время в канале регистрации определялось лишь периодом частоты записи данных в память и не зависело от величины задержки (используемого объема памяти);
- предельно быстрым циклом считывания (200 нс/ 32 бит) по магистрали крейта (Dedicated CAMAC Dataway) только из модулей, содержащих информацию, а также одновременной обработкой события во всех крейтах системы.
- восстановлением всей пространственно-временной структуры данных в пределах установленной заданной задержки

Гибридные микросхемы усилителей-дискриминаторов изготавливались в НПО «Позитрон» при кураторстве Н.Ф. Бондаря. Изготовление модулей системы CROS производилось в опытном производстве ОАОД – руководитель Г.П. Шаблий. Микропрограммное и программное обеспечение для проверки и отладки модулей системы CROS создавалось трудами А.Г. Атаманчука.



28 декабря 1989 года. Перед началом установки оборудования эксперимента E761.  
 Нижний ряд: Н.Ф. Бондарь, А.С. Денисов, А.В. Ханзадеев, Д. Лах (FNAL). Верхний ряд:  
 В.М. Самсонов, В.Л. Головцов, Н.К. Терентьев, В.Т. Грачев.

Система CROS показала высокую надежность и успешно работала в течение всех многомесячных сеансов сбора данных. В итоге была выполнена научная программа, включая исследования поляризации  $\Sigma^+$  и  $\Sigma^-$  - распада,  $\Xi^- \rightarrow \Sigma^- \gamma$  распада, поиск легких супербарионов. Коллектив разработчиков системы CROS составили А.Г. Атаманчук, Н.Ф. Бондарь, В.Л. Головцов, Л.Н. Уваров. Запуск и поддержку электроники в эксперименте осуществляли Н.Ф. Бондарь, В.Л. Головцов А.С. Денисов.



Э.М. Спириденков  
 Заведующий ОРЭ  
 1989 - 1997

Эксперимент E781 (SELEX) был посвящен исследованию очарованных барионов, их распадных характеристик. Набор данных производился в 1996-97 гг. Установка SELEX представляла собой универсальный трехступенчатый магнитный спектрометр, способный регистрировать и идентифицировать как заряженные, так и нейтральные частицы. Использовался гиперонный пучок с энергией до 600 ГэВ, падающий на различные мишени. Первая часть исследований была посвящена изучению рождения и распада очарованных частиц, вторая часть программы – измерениям полных сечений  $\Sigma^-$ ,  $\pi^-$  и  $p$ . Вспомогательной частью программы было измерение поляризуемости  $\pi^-$  и  $\Sigma^-$  - мезонов кулоновским полем при энергии 600 ГэВ с использованием аппаратного триггера на рассеяние (HST-триггера)

Подготовка электроники эксперимента E781 (SELEX) проходила на очередном, возможно наиболее динамичном, этапе масштабного развития систем сбора данных физических экспериментов - быстродействующих средств обработки и передачи данных, компьютеров (real-time computers) и средств программирования (real-time programming). Развивались Fastbus (IEEE 960) - стандарт компьютерной шины и крейтовой системы, ориентированный на работу в высокоскоростных системах сбора данных, VME (VersaModule Eurocard) - стандарт на компьютерную шину, первоначально разработанный для семейства микропроцессоров Motorola 68000, и в дальнейшем нашедший применение

для множества других приложений. Реализовывались индивидуальные варианты скоростных решений (Home-brew) для стандартной шины, как это было сделано в системах PCOS, FERA LeCroу и в нашей системе CROS.

Вклад ПИЯФ в E781 включал модернизированную систему CROS (CROS2), использовавшую часть регистрирующей электроники CROS/E761 и вновь разработанные скоростные контроллеры для работы с системой сбора данных DART установки SELEX. Система CROS2 применялась для считывания данных установки МПК, детектора переходного излучения ETRD, черенковского детектора RICH с суммарным количеством каналов  $\sim 13000$ .

Другим основополагающим направлением деятельности ОПЭ ПИЯФ совместно со специалистами Университета Карнеги-Меллон была разработка системы регистрации данных пучковых микроstriповых детекторов (BSD) и вершинных микроstriповых детекторов (VSD). Детекторы BSD измеряли импульс пучковых частиц ( $\Sigma$ ,  $\pi$ ), детекторы VSD регистрировали заряженные частицы, возникшие после взаимодействия пучковых частиц. Суммарное число каналов микроstriповых детекторов составило  $\sim 75000$ . Регистрирующая электроника BSD/VSD состояла из Fastbus модулей накопителей данных (FSDA) и контроллеров (FSCC) с доступом в систему сбора данных DART.

Еще одной разработкой, выполненной специалистами ОПЭ при участии специалистов ФНАЛ и Рочестерского Университета, явилась координатная система с программируемой логикой триггера FERS. Система использовала данные с 1920 каналов микроstriповых детекторов для реализации аппаратного триггера на рассеяние (HST) по программе исследования поляризуемости  $\Sigma$ ,  $\pi$  -мезонов кулоновским полем. В разработке HST-



Участники эксперимента E781(SELEX)  
Нижний ряд: А. Голяш, В. Малеев,  
А.Г. Атаманчук, Н.Ф. Бондарь  
Верхний ряд: Н.К. Терентьев, Л.Н. Уваров,  
В.Л. Головцов

триггера *впервые* использовались микросхемы программируемой логики FPGA (Field Gate Arrays). Тогда это были простейшие однократно программируемые наборы логических вентилях для выполнения многоходовых арифметических и логических операций. Сейчас это многократно программируемые монстры с десятками миллионов логических элементов, десятками тысяч процессоров и других элементов, включая высокоскоростные каналы передачи данных. Разработка и изготовление электроники HST-триггера производилась во ФНАЛ уже в ходе эксперимента E781 со «сверхзвуковой» скоростью: от начала проектирования до включения всей системы в эксперимент прошло всего 6 месяцев.

Суммарное количество каналов координатных детекторов E781 (SELEX) составило  $\sim 105000$ . Вся электроника считывания располагалась рядом с детекторами. Десять потоков данных, управляемых трехуровневой системой



триггера, со средней скоростью 33 МВ/с транслировались в измерительный зал и поступали на систему фильтрации, где процессорное время обработки составляло до 12 мс на событие, а скорость записи данных на ленты ~ 1 Мб/с. Сбор данных E781 (SELEX) завершился в 1997 году. Разработанные специалистами ОРЭ системы электроники показали высокую надежность и успешно эксплуатировались в течение всех многомесячных сеансов сбора данных. В эксперименте получены значительные научные результаты: обнаружен дважды очарованный барион, впервые измерен зарядовый радиус  $\Sigma^-$  - гиперона, определен радиус сильного взаимодействия  $\Sigma^-$  - гиперонов с нуклонами. Авторский коллектив ОРЭ ПИЯФ создания и поддержки систем электроники в эксперименте E781 (SELEX) составили А.Г. Атаманчук, Н.Ф. Бондарь, В.Л. Головцов, П.В. Неустроев, Л.Н. Уваров, А.Г. Голяш, Б.В. Размыслович, М.Ф. Свойский, В.Л. Степанов.

В 1996 году ПИЯФ присоединился к сотрудничеству в коллайдерном эксперименте D0 в связи с модернизацией его подсистем – трековой, мюонной и электромагнитного калориметра для проведения второго сеанса измерений (Run2). Установленный на ускорителе Теватрон детектор D0 представлял собой огромный, сложный универсальный коллайдерный детектор для исследований процессов, возникших при столкновениях протонов и антипротонов. В трековой системе координаты вылетающих частиц измерялись с помощью микростриповых и сцинтилляционных детекторов. Электромагнитный калориметр измерял энергию фотонов, электронов и потоков (струй) заряженных частиц, вылетевших из области взаимодействия. Мюонная система, измерявшая координаты треков и энергию мюонов, располагалась на периферии детектора D0; в её состав входили сверхпроводящие магниты, сцинтилляционные детекторы и минидрейфовые трубки. Всего детектор D0 содержал около миллиона детектирующих элементов. сверхпроводящие магниты, сцинтилляционные детекторы и минидрейфовые трубки.



Л. Н. Уваров у крейтов с электроникой MDT



П. В. Неустроев в комнате управления эксперимента D0

Сферой деятельности специалистов ОРЭ ПИЯФ явилась электроника мюонной системы. Была разработана, изготовлена, протестирована и успешно внедрена в эксперимент 50 000-канальная система считывания данных минидрейфовых трубок (MDT). В состав системы считывания MDT входили два типа модулей – карты оцифровывания (MDC) и контроллер крейта (MDRC) на основе DSP-процессора. Специалисты ПИЯФ осуществляли также поддержку аппаратного и программного обеспечения разработанной системы считывания

в течение второго сеанса (Run 2). Электроника считывания системы MDT размещалась в 24 крейтах 9U VME. В крейте устанавливалось до двенадцати MDC карт, контроллер MDRC и VME-процессор, выполнявший задачи управления и контроля. Карты MDC осуществляли измерение времени дрейфа с разрешением 18,8 нс, улучшая координатное разрешение MDT до нескольких миллиметров. Карты MDC имели цифровой конвейер и буферизацию событий по триггеру первого уровня L1 для хранения и последующего считывания данных MDRC- контроллером.

Электроника MDT передней мюонной системы отработала все 10 лет второго сеанса измерений с исключительной надежностью. Созданную специалистами ОПЭ ПИЯФ электронику эксперты ФНАЛ оценили в \$1М. В эксперименте D0 был получен большой объем новых сведений о свойствах и превращениях элементарных частиц, которые опубликованы в более чем трех сотнях научных статей. Наиболее важным результатом эксперимента D0 является открытие топ-кварка. В эксперименте D0 были также осуществлены прецизионные измерения масс топ-кварка и W-бозона



С. Ф. Удалова на тестовом стенде электроники системы MDT



Н. А. Осипова на стенде проверки модулей системы MDT

Авторский коллектив разработки, внедрения и поддержки эксплуатации электроники передней мюонной системы D0, составили сотрудники ОПЭ П.В. Неустроев, Л.Н. Уваров, С.Л. Уваров. В поддержке эксплуатации системы участвовали сотрудницы ОПЭ С.Ф.Удалова и Н.А. Осипова.

#### 4. Эксперименты CMS, LHCb на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРН



В.Л. Головцов  
Заведующий ОПЭ  
1998 – Настоящее  
время

Объектом участия специалистов ОПЭ в эксперименте CMS стала обширная программа создания электроники катодных стриповых камер (CSC) для Торцевой Мюонной Системы (EMU-Endcap Muons), включающая придетекторную (Front-End), электронику анодных локальных треков (ALCT – Anode Local Charge Track), электронику мюонного триггера – CSC Track Finder, высоковольтную систему (EMU HV System), электронику выстройки мюонных камер (EMU Alignment System).

##### 4.1. Придетекторная электроника CSC EMU Front-End

Переходом от гибридной технологии быстродействующих усилителей для пропорциональных камер экспериментов E761, E781 к разработке и изготовлению заказных интегральных микросхем ASIC (ASIC-

Application-Specific Integrated Circuit) для CSC- камер стала для Н.Ф. Бондаря работа в коллаборации с Университетом Карнеги Меллон (CMU). Это была пятилетняя (1995 – 2000 гг.) напряженная работа, в результате которой была создана микросхема CMP16\_g – 16-канальный усилитель -формирователь-дискриминатор, оптимизированный для входной ёмкости до 200 pF с временным разрешением  $\sim 2$  ns и потребляемой мощностью  $\sim 30$  mW/канал.



Н.Ф. Бондарь на тестовом стенде модулей AD16 F

на CSC-камерах и дан старт длительной, продолжающейся до нынешнего времени надежной работы на пучке.

Разработан также ASIC 16-канальной программируемой задержки D16G. На основе микросхем CMP16\_g были разработаны и изготовлены 16-канальные модули AD16\_F. Общее количество изготовленных модулей 12000 (192 000 каналов). В 2003 году было закончено производство и тестирование всех модулей, после чего они отправлены на фабрики производства CSC-камер в Университет Флориды (UF), Университет Калифорнии (UCLA). ПИЯФ, ИФВЭ. В 2004 году произведен монтаж и тестирование электроники

#### 4.2. Электроника анодных локальных треков – ALCT Anode Local Charge Track

ALCT электроника разработана для анодных сигналов CSC-камер EMU. Модуль ALCT принимает сигналы с выхода карт AD16\_F одной 6-слойной камеры, восстанавливает мюонные треки, используя многоуровневую технику временных совпадений, анализирует треки, сортирует их по качеству и определяет 2 лучших трека. Модули ALCT, как и модули AD16\_F размещены на CSC-камерах.



В.И. Яцюра на тестовом стенде ALCT-модулей. UCLA 2003 год

Разработаны три типа модулей ALCT 288, ALCT 384, ALCT 672 для трёх разновидностей CSC-камер. Для проверки всех трех типов модулей разработан специальный тестер. Разработку электроники в коллаборации с UCLA выполняли сотрудники ОПЭ В.И. Яцюра, М.Р. Кан, Г.Ф.Жмакин. Производство модулей размещалось в американской промышленности; в 2003 году все модули были изготовлены, протестированы и отправлены на фабрики UF, UCLA, ПИЯФ, ИФВЭ. В 2004 году для ALCT-модулей были разработаны и изготовлены сменяемые мезонинные карты с программируемой логикой для возможных последующих модификаций

алгоритмов обработки данных с более широкими возможностями реализации алгоритмов соответственно развитию технологий производства интегральных микросхем.

#### 4.3. Электроника мюонного триггера – CSC Track Finder

Электроника CSC Track Finder (CSC TF) была изначально разработана как 12 специализированных Track Finding процессоров (TF-процессоров), каждый из которых анализирует входные примитивные мюонные треки (сегменты) CSC-камер в 60-градусном азимутальном секторе, восстанавливает по сегментам и анализирует полные треки, измеряет поперечный импульс  $P_t$ . идентифицирует до 3 лучших мюонных треков.

История создания TF-процессора начиналась летом 1998 года, когда системной реализацией HST-триггера в эксперименте E781 заинтересовался ученый-физик Университета Флориды (UF) Д. Акоста, ответственный за триггер торцевой мюонной системы CMS. Состоявшееся двухстороннее детальное обсуждение темы и триггеростроения в целом завершилось в сентябре 1998 года приглашением двух разработчиков HST-триггера Б.В. Размысловича и автора этих строк в Университет Флориды для выполнения проектных работ и уже в апреле 1999 года был подписан Меморандум между UF и ПИЯФ по созданию триггера торцевой мюонной системы CMS.

Первый прототип TF- процессора был разработан и успешно прошел тестовые испытания в UF в 1999 – 2001 гг. Второй, знаковый прототип TF-процессора с реализацией



алгоритма трекового анализа на одной сверхбольшой микросхеме FPGA и полным временем выработки решения  $\sim 175$  нс привел к возможности размещения оборудования для 60-градусного сектора в одном модуле 9U VME.

Далее разработка совершенствовалась по мере развития общих подходов к проекту всей системы CMS триггера, результатов тестовых испытаний, симуляции и совершенствования микропрограмм, развития элементной базы, новых идей и т.д. К этому времени к разработке TF- процессора подключились Л.Н.

Июнь 2003 г. ЦЕРН  
Тестирование TF – процессора  
Л. Уваров, В. Головцов  
D. Acosta, B. Scurlock, H. Stoeck (UF)

Уваров и А.Г. Атаманчук. После разработки и тестовых испытаний четырех прототипов в январе 2005 года была выпущена пилотная серия и начато серийное производство модулей, которое было завершено в 2006 году. Трудозатраты на разработку и производство CSC TF системы составили  $\sim 12$  человеко-лет, объем финансирования (US CMS)  $\sim 700$  K\$.

В 2007 – 2009 гг производилась отладка взаимодействия CSC TF с системой глобального мюонного триггера, системой управления и сбора данных, произведен пробный пучковый запуск с набором статистики. В 2010 – 2012 гг проведен набор физических данных вплоть до энергии центра масс 8 ТэВ и светимости  $10^{33} \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Эксплуатация CSC TF показала его высокую надежность, что, наряду с другими характеристиками этого триггерного устройства, обеспечило стабильный набор физических данных.

В 2012 – 14 гг проводилась модернизация системы MT- триггера для обеспечения более высоких селективных характеристик при энергиях центра масс вплоть до 13 ТэВ и светимости коллайдера до уровня  $1 \times 10^{34} \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и далее до уровня  $5 \times 10^{34} \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . С этой целью использовалась современная номенклатура средств микроэлектронники, высокоскоростные каналы оптической связи, современный экономный стандарт электроники с телекоммуникационными вычислениями MicroTCA. В качестве основного элемента модернизированной системы MT-триггера разработан унифицированный модуль MTF-процессора, характеристики которого существенно улучшены в сравнении с реализованным на предыдущем этапе. Так, число водных оптических каналов возросло с 15 до 80 за счет использования 12-канальных оптических приемников, при этом скорость передачи данных возросла с 2 Гб/с до 10 Гб/с, число ячеек программируемой логики

возросло с 12 тыс. до 700 тыс., адресное поле табличной памяти для ассигнования поперечного импульса  $P_T$  увеличено с 2МБ до 1 ГБ и т.д. Основные работы по модернизации TF-процессора (MTF-процессора) проводились в Университете Флориды. Для исследования характеристик MTF-процессора, включая оптимизацию микропрограмм, в ОРЭ в 2014 году был оборудован стенд на основе стандарта MicroTCA. Назначение стенда более широкое: он может использоваться для новых разработок электроники физических экспериментов.

#### 4.4. Высоковольтная система CSC-камер EMU CMS

Вся торцевая мюонная система EMU CMS состоит из 468 шестислойных CSC-камер и каждый слой имеет от 3 до 5 секций, что требует суммарно более 10 000 каналов индивидуального высоковольтного питания. Разработка системы, обеспечивающей регулирование и измерение высоковольтного напряжения, а также измерение значения тока по всем каналам высоковольтного питания установки CSC-камер MU CMS была осуществлена специалистами ПИЯФ и UF. Работы были начаты в UF в 1999 году.



Апрель 2004 г. ОРЭ, Тестовый стенд №1.  
Ведущий разработчик CMS EMU HV-системы  
С.С. Волков



Апрель 2004 года. ОРЭ, Тестовый стенд №2.  
С.В. Бондарев и Н.Б. Исаев за проверкой модулей  
CMS EMU HV-системы

В 2001 году был изготовлен и прошел тестирование первый прототип системы. В 2003 году изготовлен и протестирован второй прототип системы, а затем выпущен сигнальный опытный образец, прошедший тестирование на камере в магнитном поле, а также - радиационный тест и тест на пучке LHC. В том же 2003 году проект UF/ PNPI системы был выбран для EMU CMS по результатам тендера с ведущей в производстве высоковольтных систем фирмой CAEN. Оцениваемая стоимость проекта UF/PNPI ~ \$ 1.2M, проекта CAEN ~ \$ 2.5M.

Параллельно шла подготовка производства UF/ PNPI системы для обеспечения высоковольтным питанием станций ME1/2, ME2, ME3, ME4/1. Производство было развернуто в ПИЯФ и на создание соответствующей инфраструктуры в ОРЭ были выделены целевые средства из бюджета проекта CMS EMU HV В короткие сроки было оборудовано 280 м<sup>2</sup> производственной площади, включающей два монтажных участка, технологический участок, участок тестирования, участок диагностики, склад с входным контролем компонентов и склад готовой

продукции. Оборудовано 2 рабочих места инженеров-разработчиков, 5 тестовых стендов

настройки модулей, включая термоэлектрические и климатические испытания. Оборудовано 4 рабочих места монтажников печатных плат и 2 рабочих места сборки модулей. Шестнадцать сотрудников отдела и других подразделений ОФВЭ были непосредственно заняты в производстве и тестировании. Общие затраты на оборудование и ремонтные работы в 2004 году составили около 1.4 миллиона рублей.

Производство системы UF/PNPI для станций ME1/2, ME2, ME3, ME4/1 было завершено в 2005 году. В 2007 состоялся системный тест в ЦЕРН, после чего UF/PNPI система была подключена к детекторам, а в 2008 году началась её успешная эксплуатация в эксперименте.

Изготовление новых CSC-камер для станции ME4 /2 потребовало дополнительных поставок 2500 каналов UF/PNPI высоковольтной системы. Производство по прежнему сценарию было начато в конце 2012 года, а к февралю 2014 года система была изготовлена и доставлена в ЦЕРН. В итоге была разработана, изготовлена и внедрена в эксплуатацию 11016-канальная система распределения высоковольтного питания катодных стриповых камер торцевой мюонной системы эксперимента CMS. Разработка, создание необходимой инфраструктуры, производство и успешная эксплуатация UF/PNPI высоковольтной системы, наличие квалифицированных специалистов инициировали развитие отрасли высоковольтных систем в ОРЭ.

В 2006 году был начат еще один проект высоковольтной системы на 2016 каналов мюонных камер LHCb. Была выбрана та же система, что и для CMS EMU, т.к. она удовлетворяла большинству требований LHCb. До того в 2005 году состоялся и вновь положительно тендер с фирмой CAEN с заявленными ценами: UF/PNPI – 320 KCHF, CAEN – 700 KCHF.

Всего для установки LHCb требовалось 4032 канала высоковольтной системы (HV LHCb) и чтобы минимизировать начальную цену её производство было разделено на два этапа. На первом этапе было изготовлено только 2016 каналов, и подача высоковольтного напряжения на все каналы осуществлялась через специальное разделительное устройство.

Первые два года эксплуатации были напряженными, т.к. обнаружилась пониженная надежность высоковольтных резисторов одной закупленной партии: это вызывало дрейф выходного напряжения. Проблема решалась процедурой калибровки, а во время перерыва в работе коллайдера все ненадежные резисторы были заменены. Некоторая коррекция потребовалась для высоковольтных регуляторов. Все проблемы в итоге были решены и учтены при производстве второй половины LHCb HV системы. Дальнейшая работа всей установленной системы на пучке оставалась надежной.

Участниками проекта UF/PNPI высоковольтной системы являются сотрудники ОРЭ С.С. Волков, С.В. Бондарев, Н.Б. Исаев, Е.М. Оришин, Л.О. Сергеев, И.Ю.Славнов, Г.В. Ясенова, А.В. Мыльникова, Н.М. Гулина, В.И. Иванова, Н.С.Самсоненкова, Н.А. Осипова, С.И. Калентарова, сотрудники ОФВЭ В.И. Лазарев, В.В. Асташин и др.

Дальнейшее развитие CMS EMU высоковольтной системы связано с переходом коллайдера на повышенную и высокую светимость. Две высоковольтные системы CMS EMU – 11016-канальная UF/PNPI и 432- канальная CAEN изначально не имеют достаточного запаса для работы с комфортным коэффициентом безопасности при ожидаемом увеличении загрузки в 5-7 раз выше номинальной. Проведенный к 2018 году новый дизайн UF/PNPI системы позволяет перейти от трехуровневой к двухуровневой структуре путем замены промышленных источников высоковольтного питания и восьмиканальных головных модулей девятиканальными модулями с встроенными

регулируемыми источниками питания, обеспечивающими достаточно высокий коэффициент безопасности. К слову, надежность этих встроенных миниатюрных источников питания, определяемая как среднее время перед сбоем, составляет 840000 часов или 95 лет непрерывной работы. В результате было принято решение об оснащении всех станций CMS EMU, включая станцию ME1/1, модернизированной системой UF/PNPI. Работы должны быть осуществлены до 2021 года в процессе т.н. Фазы 2 при наличии финансирования.

#### 4.5 Электроника системы выстройки CMS EMU.



В.А. Скаррь  
Разработчик  
системы  
выстройки  
EMU

Геометрическое положение 468 закрепленных на дисках магнита CSC – камер должно определяться с точностью 100 мкм в азимутальной плоскости и с миллиметровой точностью в Z-направлении. Ситуация усложнена существенной деформацией железных дисков в магнитном поле. Для постоянного контроля за положением CSC-камер разработана и изготовлена система выстройки CMS EMU. Система использует оптические позиционные сенсоры, следящие за положением прямой линии лазера. Этот процесс слежения производится под управлением DSP-процессоров. Система считывания данных сенсоров передает данные в головную систему сбора данных для мониторингования и анализа. В состав системы входят более 1200 придетекторных сенсорных плат, более 300 плат считывания и более 100 интерфейсных плат. Разработка системы производилась в коллаборации с Университетом Висконсина в 1999- 2003 гг. В 2006 году произведена сборка оборудования, разработка программного обеспечения. В 2006-2007 гг выполнены глобальные тесты всей системы выстройки, а в 2008 году – запуск системы, мониторингование и анализ считываемых данных. В разработке, тестировании и обслуживании электроники системы выстройки принимали участие сотрудники ОПЭ В.А. Скаррь, Е.М. Орищин и А.Г. Голяш.

### 5. Текущие проекты

Достигнутый на рубеже веков высокий уровень разработок отдела, отмеченный вышеперечисленным перечнем работ, остается таковым и до нынешних времен. Мы стараемся не отставать от стремительно развивающихся технологий электроники и средств проектирования. Динамика разработок электроники сохраняется в том объеме, который определяется физическими экспериментами нашего отделения. Именно они определяют реализованные и текущие проекты отдела.

#### 5.1 Система считывания данных трековых детекторов CROS3

Следующая за системами CROS и CROS2 система считывания данных трековых детекторов CROS3 начала разрабатываться в 2005 году. Идея разработки состояла в создании современной быстродействующей и экономически эффективной считывающей электроники трековых детекторов современных физических экспериментов. Система адаптируется под конструкцию детектора и позволяет организовать структуру последовательной фильтрации данных. В систему изначально закладывались следующие особенности:

- предусилитель, дискриминатор, схемы задержки и считывания располагаются непосредственно на детекторе.
- быстрое кодирование и считывание данных с частотой не ниже 100 МГц.

- возможность измерения с дискретностью 2.5 нс временного распределения сработавших каналов в интервале «ворот» схемы совпадений.

Современные FPGA микросхемы, доступные микросхемы ASIC или качественный дизайн с дискретными элементами для придетекторной электроники, оптические каналы связи, развитая технология многослойных печатных плат позволяли разработать надежные и быстродействующие устройства серии CROS3.

Первые разработки семейства CROS3 были ориентированы на многопроводочные пропорциональные камеры (PWC) и дрейфовые камеры (DC) с гексагональной структурой ячеек. Соответственно в аналоговой части системы использовались ASIC CMP-16G для применения с PWC и ASIC ASD-Q - для применения с DC в последующих разработках



Сентябрь 2006 г. Дармштадт  
В.И. Яцюра и Л.Н. Уваров подключают  
систему CROS3\_B  
для эксперимента LAND

(модификациях) системы CROS3 придетекторная электроника реализовывалась на дискретных элементах для CROS3\_B, аналого-цифровых преобразователях АЦП для CROS3\_N. Модернизировался системный интерфейс от первоначального PCI до текущего 1 Гб Ethernet.

В 2006 году были сданы в эксплуатацию 512 каналов системы CROS3\_DC для эксперимента LAND в GSI с частотой триггерных запусков ~ 100 кГц.

В 2007 году состоялся запуск 2000 каналов системы CROS3\_PWC для

эксперимента НЭС на пучке синхроциклотрона ПИЯФ. Эффективность внедрения системы CROS3\_PWC видна на следующем примере: среднее время считывания события для установки НЭС составило 13 мкс, а для прежней системы - 350 мкс. В 2012 году система CROS3\_PWC переехала в Гамбург и используется в эксперименте OLYMPUS (DESY).

В 2010 году поставлено 2500 каналов системы CROS3\_B для установки дрейфовых камер эксперимента BGO-OD ELSA Бонн, а в 2011 году началась работа системы на пучке. Характерно, что со времени запуска системы рекламаций на неё не поступало.

В 2013 году было поставлено 200 каналов системы CROS3\_N для установки фотоумножителей эксперимента по поиску стерильного нейтрино Нейтрино-4. В 2016 в году система была установлена на реакторе CM3 Димитровграде, откуда от экспериментаторов поступил следующий отзыв: «За 8 месяцев работы данного детектора и 3 года работы прототипа система показала себя как надежное, выполненное на высоком профессиональном уровне изделие, которое можно с успехом применять для решения сложных научных задач». В настоящее время обсуждается вопрос модернизации системы CROS3\_N с дополнительным количеством каналов придетекторной электроники.

В 2014 году было поставлено 576 каналов электроники CROS3\_P для эксперимента Polfusion и 96 каналов электроники CROS3\_L для тестового стенда камер LHCb

Как модернизация системы CROS3 в рамках проекта эксперимента SHiP на SPS-ускорителе ЦЕРН разработана концепция системы считывания данных Straw-трекера. Проект системы считывания данных Straw-трекера находится в стадии разработки к четвертому поколению системы считывания CROS.



В проекте CROS3 приняли участие сотрудники ОПЭ Н.Ф. Бондарь, В.Л. Головцов, Л.Н. Уваров, С.Л. Уваров, В.И. Яцюра, Н.В. Грузинский, Е.М. Оришин, Э.М. Спириденков, Е.А. Лобачев и др

### 5.2 Высоковольтная система нейтронного детектора NeuLAND

Система распределения высоковольтного питания HVDS (High Voltage Distribution System) изготавливается для нового высокоапертурного нейтронного детектора на базе фотоумножителей NeuLAND экспериментальной установки R3B коллаборации NUSTAR. Договор заключен в 2014 году. Как и предыдущие высоковольтные системы HVDS

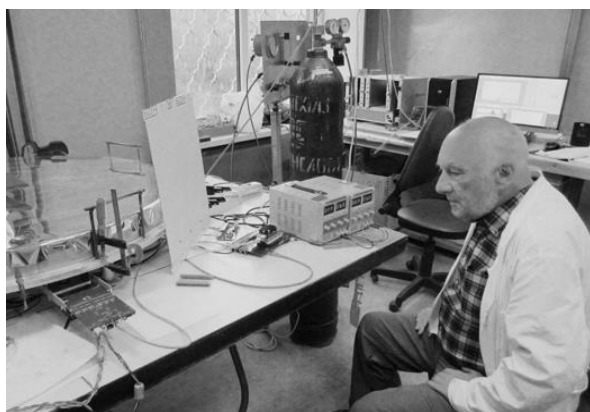


Декабрь 2014 года. GSI. Е.М. Оришин и Н.В. Грузинский наблюдают результаты измерений характеристик первой партии модулей

управляющий модуль. Поставки оборудования начались в 2014 году и всего изготовлено 6000 каналов. В проекте HVDS NeuLAND заняты С.С. Волков, Л.Н. Уваров, С.В. Бондарев, Н.Б. Исаев, Н.В. Грузинский, В. И. Яцюра ...

выполняет индивидуальное понижающее регулирование и мониторинг напряжения и тока для каждого канала. Система имеет два уровня. На первом уровне - коммерческий высоковольтный источник, на втором - 50-канальные модули, осуществляющие понижающее регулирование в полном диапазоне исходного напряжения и мониторинг напряжения и тока. Система работает под управлением компьютера через сеть Ethernet, используя специально разработанный

### 5.3. Электроника эксперимента «ПРОТОН».



Ноябрь, 2019 г. П.В. Неустроев исследует работу придетекторной электроники трекового спектрометра в комплекте с концентратором CROS3\_P

Экспериментальная установка ПРОТОН имеет в своем составе три спектрометра – времяпролетный, трековый и пучковый. Считывание данных спектрометров установки ПРОТОН осуществляется через придетекторную электронику и далее – через концентраторы CROS3 с блоком Ethernet-интерфейса для связи с системой сбора данных эксперимента. Разрабатываемая придетекторная электроника системы CROS3\_P базируется на аппаратной платформе 24/48-канальных предусилителей, Flash ADC и логики FPGA, представляющей широкое поле для микропрограммирования. Возможны два режима работы – режим самозапуска и режим системного триггера. Предполагается наличие специальной логики, учитывающей специфику детектора и позволяющей оптимальным образом вырабатывать системный триггер. В проекте «ПРОТОН» участвуют сотрудники ОПЭ П.В. Неустроев, Э.М. Спириденков, Н.В. Грузинский, В.И. Яцюра

Экспериментальная установка ПРОТОН имеет в своем составе три спектрометра – времяпролетный, трековый и пучковый. Считывание данных спектрометров установки ПРОТОН осуществляется через придетекторную электронику и далее – через концентраторы CROS3 с блоком Ethernet-интерфейса для связи с системой сбора данных эксперимента.

Разрабатываемая придетекторная электроника системы CROS3\_P базируется на аппаратной платформе 24/48-канальных предусилителей, Flash ADC и логики FPGA, представляющей широкое поле для микропрограммирования.



Отделу радиоэлектроники исполнилось 50 лет. За полвека пройден славный путь становления, расцвета, преодоления трудностей, трудовых успехов и достижений. Все эти годы коллектив отдела в меру сил достойно трудился, обеспечивая подразделения ОФВЭ и международные коллаборации различных физических экспериментов современной электроникой. И в настоящее время высокая квалификация и опыт сотрудников позволяют отделу выполнять текущие разработки на уровне современной элементной базы, находить решения сложных технических и технологических задач.



Искренне благодарю уважаемых Александра Сергеевича Денисова и Петра Всеволодовича Неустроева за их краткие, но емкие воспоминания времен начала ОРЭ и далее.