



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2002–18
ОЭА

Л.Л. Закамский, Л.Л. Курчанинов, Г.Я. Митрофанов, А.М. Моисеев

**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МОДУЛЕЙ
АДРОННОГО ТОРЦЕВОГО КАЛОРИМЕТРА
ДЕТЕКТОРА АТЛАС**

Протвино 2002

УДК 519.688

Аннотация

Закамский Л.Л., Курчанинов Л.Л., Митрофанов Г.Я., Моисеев А.М. Система контроля качества модулей адронного торцевого калориметра детектора ATLAS: Препринт ИФВЭ 2002–18. – Протвино, 2002. – 11 с., 10 рис., библиогр.: 3.

Описано программное обеспечение системы контроля качества модулей адронного торцевого калориметра детектора ATLAS. Разработка реализована в ИФВЭ (Протвино) на базе IBM PC и измерительных приборов KEITHLEY-2000, KEITHLEY-7001, HP-4263. Управление приборами осуществляется через канал GPIB с использованием программного пакета TestPoint. Рассмотрена методика измерений с автоматизированным сбором данных, приведены результаты испытаний модулей калориметра, собранных в ИФВЭ.

Abstract

Zakamsky L.L., Kurchaninov L.L., Mitrofanov G.Ya., Moiseev A.M. The Quality Control System for Hadron End Cap Calorimeter Modules of the Detector ATLAS: IHEP Preprint 2002 – 18. – Protvino, 2002. – p.11, figs.10, refs.: 3.

The software for quality control of modules of the Hadron End Cap Calorimeter for the detector ATLAS is described. The system was developed at IHEP (Protvino) with the following equipment: IBM PC, KEITHLEY-2000, KEITHLEY-7001, HP-4263, GPIB, by using TestPoint as a programming tool. The methods of measurements with an automatic data acquisition are considered. The test results for the calorimeter modules, which have been assembled at IHEP, are given.

Введение

В рамках международного сотрудничества по установке АТЛАС [1] ИФВЭ (Протвино) принимает участие в разработке, изготовлении и испытаниях внешней секции жидкого аргона (АТК2). В частности, в ОЭП ИФВЭ производятся металлические комплектующие его модулей. Собираемые модули и их составляющие испытываются по ходу и по завершении сборки, а затем, после доставки модулей в ЦЕРН, проводятся их окончательные испытания в жидкого аргона криостате ЦЕРН'а также силами сотрудников ИФВЭ.

Для сборки модулей и оценки их электрических характеристик в ИФВЭ был создан технологический участок, оснащенный измерительными приборами для тестирования модулей в соответствии с правилами контроля качества, принятыми в АТК коллаборации. Измерительные приборы участка объединены в автоматизированную систему сбора данных под управлением персонального компьютера.

В данной работе описаны: методика контроля качества модулей АТК, созданная в ИФВЭ автоматизированная система измерений и сбора данных, некоторые результаты испытания собранных в ИФВЭ модулей, анализ этих результатов и их представление в базе данных.

1. Особенности устройства АТК2

Установка АТЛАС имеет два одинаковых АТК, расположенных симметрично относительно точки пересечения пучков. Принцип действия и конструктивные особенности АТК подробно описаны в [2]. Каждый из них состоит из двух кольцеобразных секций (“колес”), в рабочем состоянии погруженных в жидкий аргон. Каждое “колесо” собрано из 32 одинаковых модулей (секторов). Модули внешнего “колеса”, производящиеся в ИФВЭ, состоят из медного поглотителя: 16 пластин толщиной 50 мм и одной 25 мм пластины, отделенных друг от друга 8,5 мм зазорами, и регистрирующих элементов – структур из электродов, размещенных в зазорах. Электроды разделены изолирующими прокладками из сотопластика. Центральный сигнальный электрод (СЭ) регистрирующего элемента сегментирован на электронезависимые ячейки (пэды). Два простых (сплошных) электрода по сторонам СЭ включены по схеме электростатического трансформатора (так называемые ЭСТ-электроды). Поверхности всех электродов покрыты тонким слоем высокорезистивного покрытия (ВРП), на которое подается напряжение.

16 слоев модуля имеют 4 типа СЭ, отличающихся по геометрии разделения на пэды. Слои одинаковой геометрии являются соседними. Для вывода сигналов электрические элементы объединены системой плат и кабелей, которую мы далее называем кабельной обвязкой.

2. Методика испытания модуля АТК и его компонентов

Порядок испытания каждого модуля АТК, вытекающий из требований контроля качества, детально описан в [3]. Согласно этому документу полные испытания каждого из компонентов

модуля должны быть проведены производителями последних (это правило достаточно общее в коллаборации: качество изделия проверяет производитель). Поэтому впоследствии перед сборкой модулей достаточно провести тесты, позволяющие удостовериться, что не произошло повреждений их компонентов при транспортировке.

Проверка качества материалов и геометрических размеров металлических компонентов модулей также относится, прежде всего, к компетенции изготовителей, изделия поставляются с техническим паспортом.

Далее мы рассмотрим процедуры и порядок электрических испытаний регистрирующих элементов и тестирования модуля АТК в целом.

В эти тесты входят:

1. До начала сборки модуля:

- визуальная проверка состояния ВРП;
- проверка наличия контактов (между внешними пинами и соответствующими им пэдами и т.д.);
- измерение сопротивления между электродами подачи высокого напряжения.

2. Во время сборки модуля:

- измерение тока утечки через изолирующие слои СЭ и ЭСТЭ при напряжении 2.0 кВ, поданном на ВРП, и через разделительные прокладки из сотопласта между электродами;
- измерение емкости каждой ячейки регистрирующего элемента, соответствующей отдельному пэду (с незаземленными ЭСТЭ).

3. После завершения сборки модуля:

- измерение полного тока утечки через модуль;
- измерение емкостей проективных “башен”, соответствующих определенным интервалам псевдобыстроты, в которые объединены несколько простых ячеек согласно схеме кабельной разводки, т.е. емкостей на отдельных контактах сигнальных разъемов;
- долговременная проверка на отсутствие пробоев под напряжением 2,0 кВ.

3. Стенд тестирования модулей

Возможности технологического участка ИФВЭ, расположенного в специально построенным “чистом” (т.е. с контролируемой концентрацией пыли) помещении, позволяют вести сборку двух модулей одновременно. На его базе в полном соответствии с описанной методикой создан стенд испытания модулей (см. **рис. 1**).

Стенд представляет собой набор источников напряжения и измерительных приборов, подсоединенных к компьютеру с помощью шины GPIB. Измерительные приборы: мультиметры KEITHLEY-2000, измеритель LCR – HP 4263B и сканер KEITHLEY-7001 – имеют встроенные процессоры и могут работать как в автономном режиме, так и под управлением внешней ЭВМ. В нашем случае общее управление осуществляется IBM PC. Наличие двух одинаковых мультиметров KEITHLEY-2000 объясняется тем, что один из них может быть задействован в длительных испытаниях, а второй при этом может потребоваться для каких-либо текущих измерений. Отметим также, что сканер KEITHLEY-7001 соединяется с тестируемым оборудованием через специальные коммуникационные карты. В нашем варианте их две, каждая обеспечивает переключение по десяти различным направлениям. В зависимости от вида измерений мы используем либо 4, либо 8+8 каналов. Обозначенная на рисунке связь между компьютером и высоковольтным источником (HV) – это планируемое управление высоковольтным источником через цифро-аналоговый преобразователь в виде специальной компьютерной карты. Способ использования каждого из устройств в различных видах измерений будет описан ниже.

HEC Quality Control System at IHEP

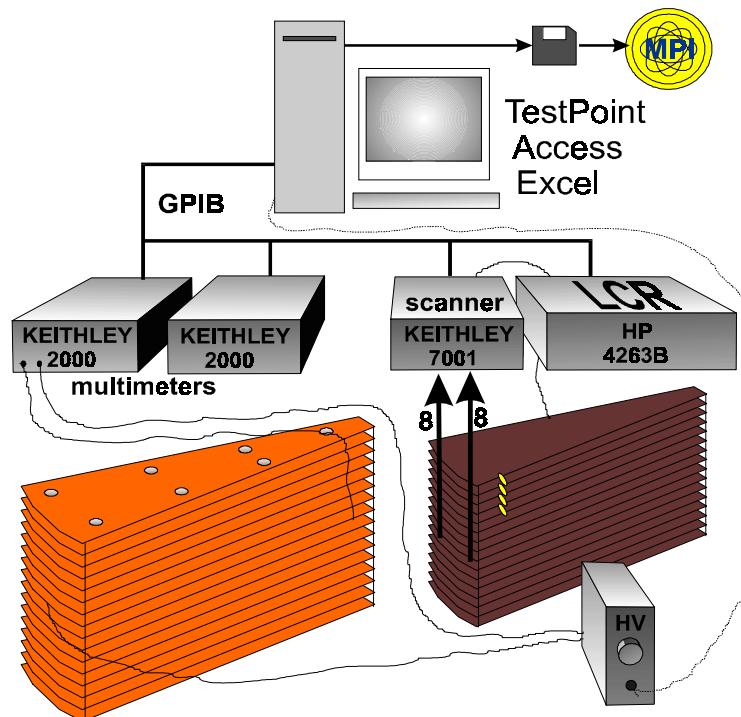


Рис. 1. Оборудование стенда системы контроля качества модулей АТК.

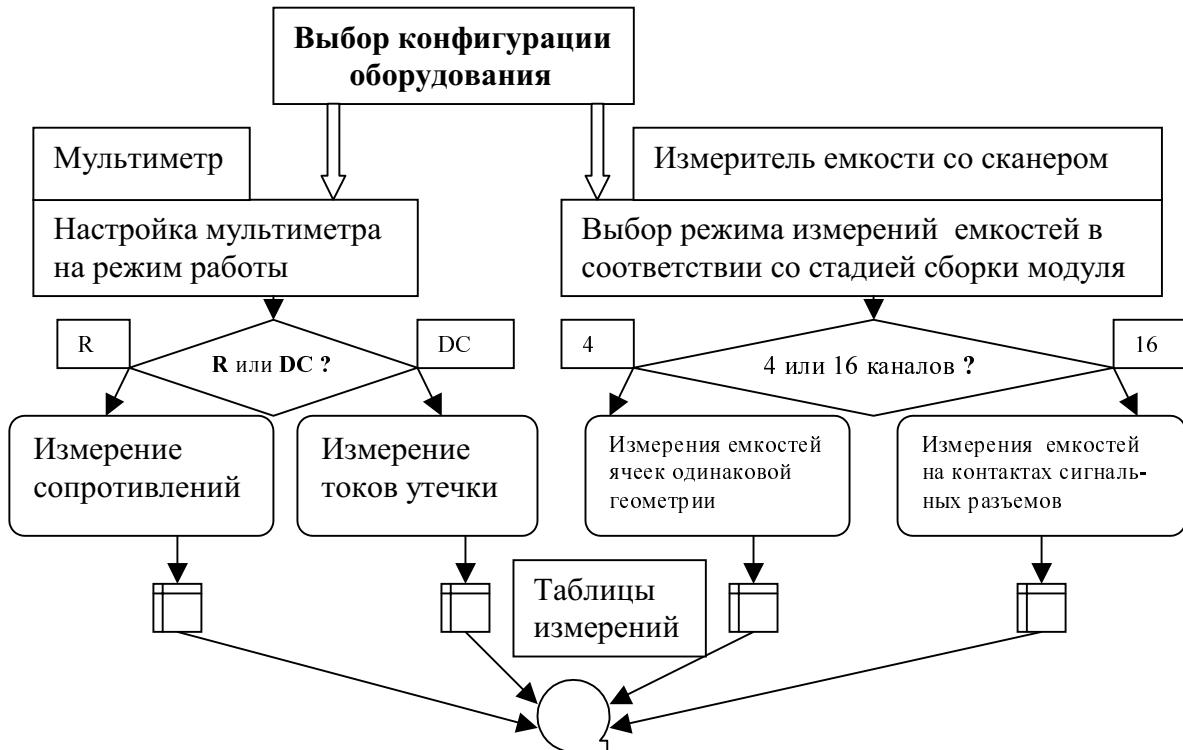


Рис. 2. Общая схема математического обеспечения системы контроля качества модулей АТК.

Программное обеспечение создано в ИФВЭ. Оно адекватно как решаемым задачам, так и набору оборудования, поэтому далее будем следовать логике программного обеспечения для описания системы в целом (см. **рис. 2**).

Сначала отметим наиболее общие положения. В качестве средства разработки использован лицензионный пакет TestPoint (Capital Equipment Corporation, Massachusetts, US). Выбор последнего был в значительной мере обусловлен сотрудничеством с Институтом Макса Планка (Мюнхен).

Система программного обеспечения, разработанная в ИФВЭ, с точки зрения пользователя, представляет собой иерархическую последовательность виртуальных панелей. Соответственно, самый верхний уровень – это панель выбора режимов измерений, связанных с конкретными измерительными приборами (см. **рис. 2**). Возможно как индивидуальное, так и совместное использование трех видов приборов, задействованных в системе.

Следующий уровень также подготовительный, он обеспечивает операции по настройке выбранных приборов с помощью их индивидуальных виртуальных панелей и осуществляет заказ на средства отображения в следующем, рабочем, уровне.

Рабочий уровень позволяет оператору визуально контролировать процесс измерений, так как поступающие данные можно выводить на экран в форме таблиц, заполняющихся в режиме реального времени, и динамических графиков. Здесь же обеспечены средства диалога: оператор называет системе имена используемых файлов; назначает периодичность измерений в долгосрочных тестах; делает повторные измерения в случае надобности, пробные или дополнительные (к автоматическим) замеры.

Программное обеспечение построено на основе следующих принципов. Полностью автоматизирована передача всех измеряемых электрических характеристик от оборудования до таблиц, экспортируемых в базу данных – эта задача ставилась как основная. При этом весьма высокая степень автоматизации достигнута за счет использования сканера, способного обеспечить доступ по 20 независимым каналам. Реально мы используем 16 из них: 2 разъема по 8 контактов.

Известно, что “человеческий фактор” является источником ошибок, поэтому он сведен до минимума. Если измерительная процедура полностью детерминирована, как это имеет место для всех тестов на собранном модуле, то имена табличных строк также формируются автоматически, а в случае длительных тестов команда на считывание информации подается автоматически по компьютерным часам на основе заданного пользователем интервала.

Разумеется, приоритет в управлении системой сохраняется за оператором, система только осуществляет заданные последовательности измерений и подсказывает оператору, какие действия с его стороны должны быть выполнены (например, какие разъемы и куда должны быть подсоединенны для продолжения измерений в автоматическом режиме). В длительных процессах оператору обеспечена возможность опрашивать текущее значение параметра без его регистрации – “только посмотреть”, а в случае необходимости сделать дополнительную запись данных – “посмотреть и зарегистрировать”, не выходя из автоматического режима измерений.

В таблицы базы данных вносится вручную только титульная информация о модулях, в частности паспортные данные для медных пластин, о которых говорилось выше, их основные размеры, серийные номера регистрирующих элементов, а также показания влажности и запыленности в помещении.

Каждая полученная строка любой таблицы является независимой записью в файл, она снабжается датой и временем. На случай сбоев компьютера файл с измерительными данными открыт только в процессе добавления очередной строки, так что вероятность испортить данные по объективным причинам крайне низка, причем не более чем одну последнюю строку. Соответственно, итоговый файл становится одновременно и протоколом измерений.

Если во время измерений были замечены какие-либо ошибки: неправильное подсоединение, плохой контакт – можно произвести перемер, добавив комментарий в специальном столбце, который имеется во всех таблицах. Если разрешены перемеры в пределах одной строки, как это имеет место при измерении сопротивлений, содержимое соответствующей ячейки в таблице просто перезаписывается, а в протоколе измерений остаются только последние значения. Любые ручные изменения итоговых таблиц также возможны, но при этом протокольные записи сохраняются.

Во всех режимах измерений имеется специальная виртуальная кнопка принудительного спасения данных. При ее нажатии таблица измерений копируется в том виде, как выглядит на экране, со всеми ручными исправлениями и добавлениями. Настоятельно рекомендуется нажимать эту кнопку по завершении измерений, даже если никаких ручных правок не делалось. При этом рабочий файл будет состоять из двух частей – протокола измерений и итоговой таблицы.

Кроме того, имеется кнопка, позволяющая оператору выбрать (сменить) рабочий (итоговый) файл или сделать его копию на другом носителе. Нажатие этой кнопки фактически означает вступление оператора в диалог с операционной системой. Во избежание потери данных, выбор уже имеющегося файла означает запись в режиме дополнения.

Все данные накапливаются в таблицах в формате “Comma Separated Values” (CSV), но реально мы используем вместо запятой знак табуляции. При импортировании этих таблиц в MS Access и Excel он “работает” как разделитель столбцов, а если мы рассматриваем файл с измерительными данными как обычный текстовый, то вид таблицы сохраняется.

Система не нуждается в каких-либо дополнительных инструкциях для работы с ней – справочная информация предоставляется пользователю в режиме on-line, и даже получение полного описания системы в напечатанном виде, включая все рабочие виртуальные панели и комментарии, заложено в пакете “TestPoint”.

Система открыта для модернизации – это настоящая потребность, так как наработка методик идет параллельно с созданием модулей, соответственно, вводятся новые возможности, добавляются и изменяются комментарии, учитываются особенности новых версий программных продуктов MS Office. Более того, обеспечены средства разработчика, упрощающие полную переориентацию всего оборудования (достаточно универсального) на другие задачи. Специальные окна-индикаторы на виртуальных панелях позволяют увидеть внутренние процессы в системе: последовательности команд, передаваемые приборам, их ответные сообщения. Здесь просто используется наличие свободного времени для выдачи дополнительной информации. Специфика оборудования (прежде всего, самих модулей) такова, что в любом случае мы вынуждены делать задержки между измерениями, необходимые для разрядки емкостей.

В соответствии с соглашением, принятым в АТК коллаборации, конечным продуктом системы сбора данных и последующей обработки является подготовка так называемой книги MS Excel для каждого собранного модуля. В свою очередь, каждая “книга” состоит из нескольких “листов” с таблицами, содержащими различные виды измерений. Все они снабжаются результатами обработки в графическом представлении, рисунки передаются в базу данных в “своих” листах.

База данных, централизованно создаваемая в ЦЕРНе, переиздается Институтом Макса Планка (Мюнхен, Германия) несколько раз в год в виде CD. Допустимы изменения “обратным числом” например повторные измерения после ремонта модуля, дополнительные измерения и результаты обработки, если целесообразность последней была установлена позже.

4. Результаты электрических испытаний модулей АТК

Ниже приводятся некоторые результаты электрических измерений для модулей, собранных в ИФВЭ до конца 2001 г. Здесь мы не ставим цели дать глобальное описание всей накопленной статистики – это задача базы данных, – а лишь продемонстрируем на конкретных примерах методику проведения измерений, способы представления результатов и выявленные особенности.

4.1. Сопротивления

Как уже отмечалось ранее, поверхности сигнального (пэдового) электрода и двух ЭСТ-электродов имеют с двух сторон ВРП, которые физически представляют из себя листы каптона с углеродным наполнителем (Carbon Loaded Kapton (CLK)). Таким образом, для каждого регистрирующего элемента модуля требуется измерение шести сопротивлений этих слоев. Оценивая накопленную статистику, мы можем видеть, что разброс сопротивлений листов CLK, изготавляемых фирмой “Dupont” (США), зависит от поставляемой партии и в целом достаточно велик. Если для модуля CR23 (рис. 3) диапазон сопротивлений для сигнальных электродов (PAD_Fr, PAD_Re) составляет около десяти процентов, то для модуля CR13 (рис. 4) наблюдается значительный разброс этих характеристик (с четырехкратным максимальным расхождением) даже для СЭ одинаковой геометрии. Интересно отметить, что у этого модуля нижняя четверка слоев (Gap37-Gap40), собранных с электродами предыдущей поставки, имеет наименьший разброс по сопротивлениям.

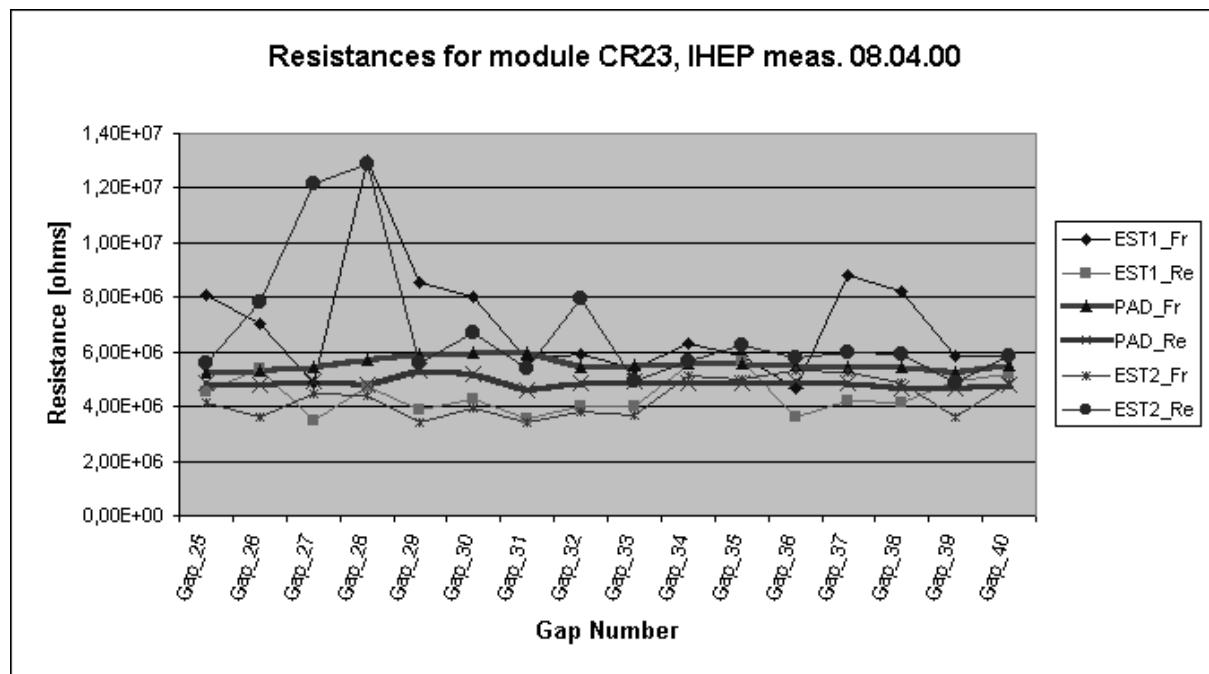


Рис. 3. Результаты измерения сопротивлений для слоев модуля CR23.

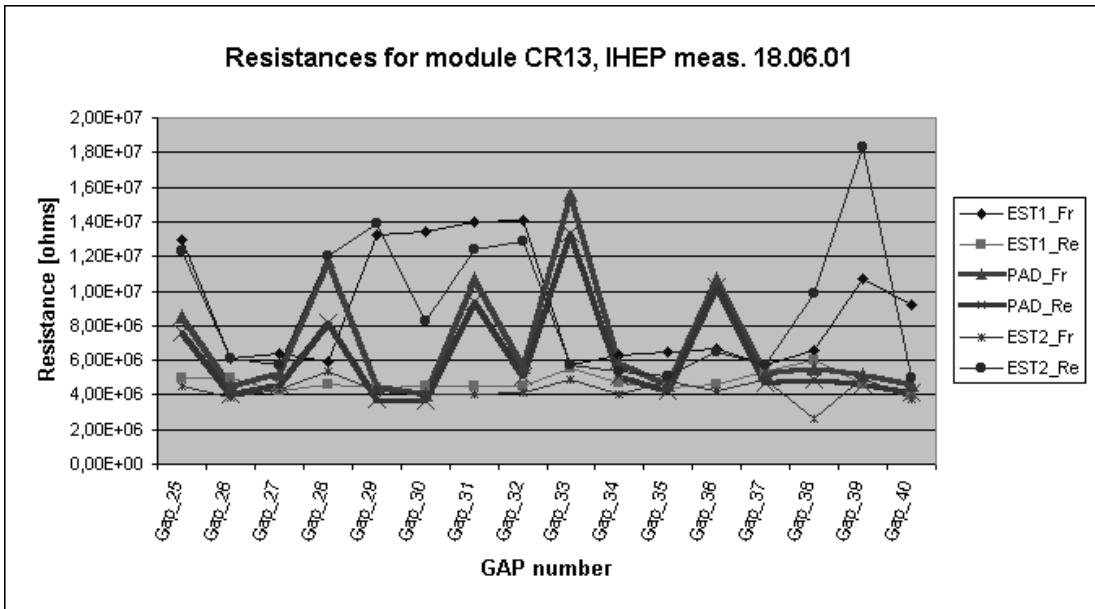


Рис. 4. Результаты измерения сопротивлений для слоев модуля CR13.

4.2. Токи утечки

Измерение токов утечки предназначено, прежде всего, для выявления замыканий между изолированными токопроводящими слоями. Если же замыкания отсутствуют (или выявлены и устранены) далее мы уже получаем прогнозируемые зависимости. Так, например, весьма ожидаемой является прямая зависимость от влажности в помещении сборки модулей (см. рис. 5). То же можно сказать и об уменьшении токов утечки в долгосрочных тестах – происходит своего рода “тренировка”, характерная для высоковольтных устройств (см. рис. 6).

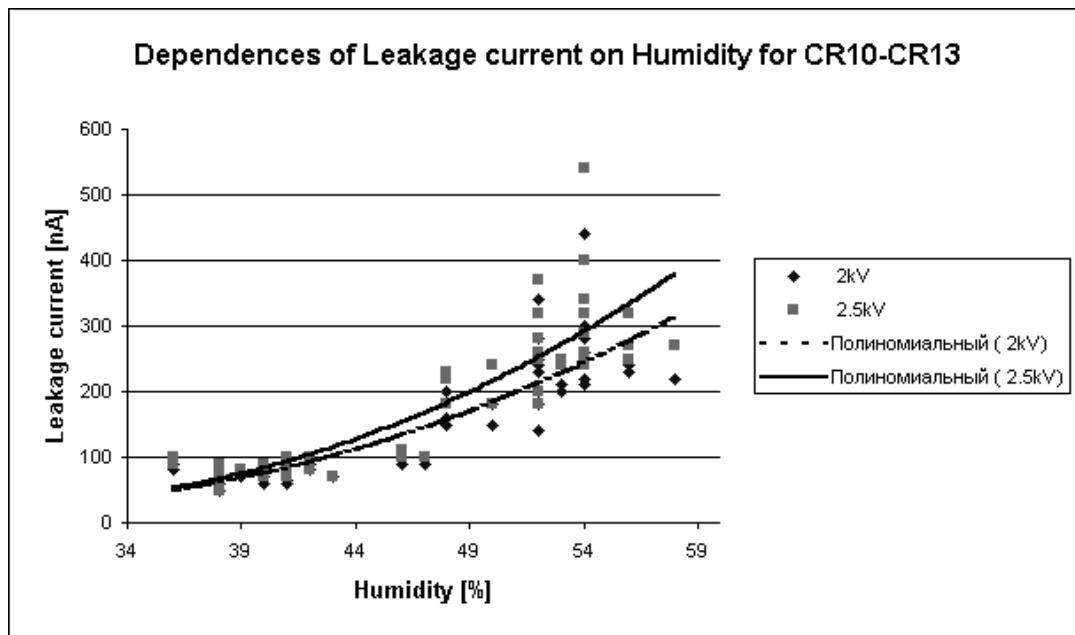


Рис. 5. Зависимость токов утечки от влажности при напряжениях 2 и 2.5 кВ.

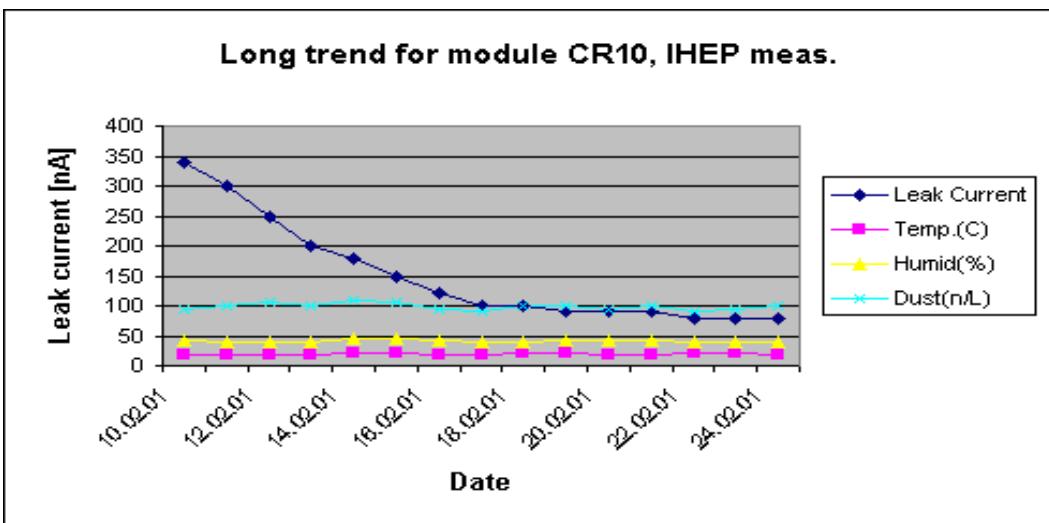


Рис. 6. Характерный пример уменьшения токов утечки при долгосрочных измерениях.

Этот вид измерений позволяет сделать другие менее очевидные выводы. На **рис. 5** представлены данные для четырех модулей CR10-CR13, в качестве интерполирующих кривых использованы полиномы второго порядка. Выбрано по два модуля зимней и летней сборки. Здесь есть граница между зимней и летней относительной влажностью, и она находится между 47 и 48%.

Соответственно, если использовать кусочную аппроксимацию данной зависимости отдельно для модулей летней и зимней сборки, то получим разрыв первого рода в указанной точке. Вероятнее всего, он объясняется тем, что на токи утечки влияет не только относительная, но и абсолютная влажность в помещении. Этот эффект можно также объяснить остаточной влажностью, накопленной в прослойках из сотопласта еще до сборки.

4.3. Калибровка системы измерения емкостей

Поскольку пэды являются начальными элементами незамкнутых электрических цепей, измерение емкостей соответствующих им ячеек регистрирующих элементов – это, прежде всего, проверка наличия контактов с ними. Как уже отмечалось выше, мы делаем два вида измерений емкостей: по 4-м каналам индивидуально для каждой ячейки в процессе сборки модулей (проверка отсутствия замыканий между пэдами) и по 16-ти каналам после установки кабельной обвязки – с разъемов, но в любом случае используется сканер и соединительные провода, имеющие емкость. Таким образом, необходима калибровка системы, т.е. измерения собственных емкостей ее каналов (без подключения к модулю). С точки зрения калибровки, нет никакой разницы между двумя видами измерений (4 или 16 каналов), так что ограничимся только первым вариантом. На **рис. 7** показаны эти данные, полученные путем трехкратного измерения емкостей по четырем каналам.

Многочисленные калибровочные измерения показывают, что случайные ошибки малы и нет видимой зависимости емкостей ни от номера канала, ни от частоты – проводники идентичны и не реагируют на изменение частоты. Этот факт позволяет все калибровочные измерения представить в виде одной константы. Незначительный параллельный сдвиг, обусловленный этой константой, совершенно не изменит качественной картины в графическом представлении емкостей ячеек, даже если мы используем исходные измерения без калибровки. Однако калибровочные измерения регулярно проводятся и заносятся в базу данных на случай более детального изучения электрических параметров модулей.

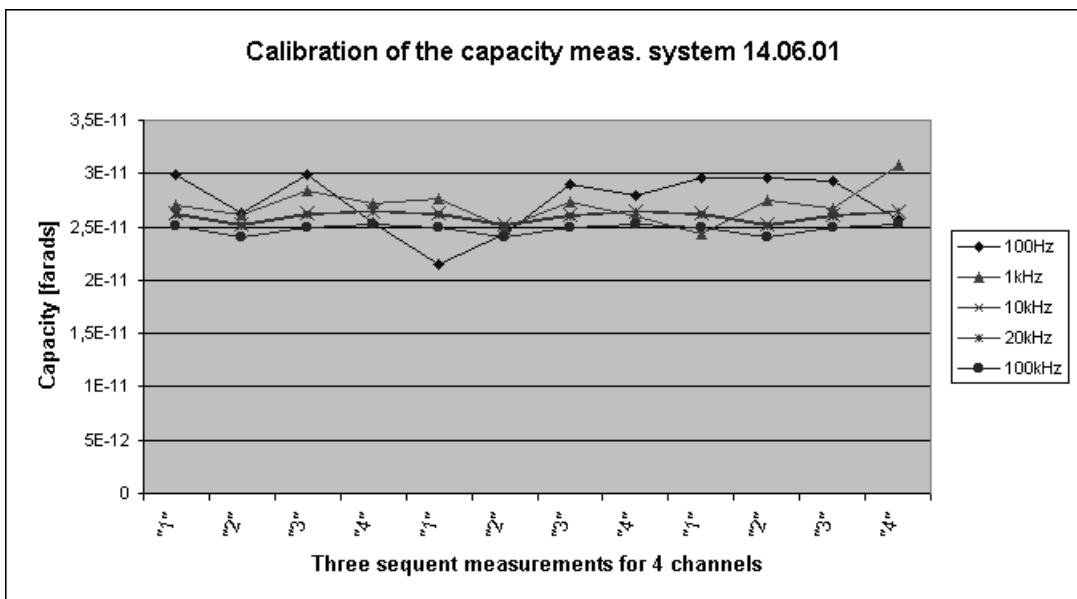


Рис. 7. Результаты калибровки системы измерения емкостей.

4.4. Емкости

При измерениях емкостей очевидна зависимость между площадью пэдов и емкостью ячеек регистрирующих элементов, соответствующих этим пэдам. Проявляются и электрические связи – в процессе измерений заряженный пэд электризует материалы в ближайшем от себя окружении. Отсюда еще три причины, влияющие на измеряемое значение емкости: используемая частота, сопротивление ВРП пэда и геометрическое положение пэда на электроде.

Первые три фактора хорошо просматриваются на прилагаемых **рис. 8, 9**.

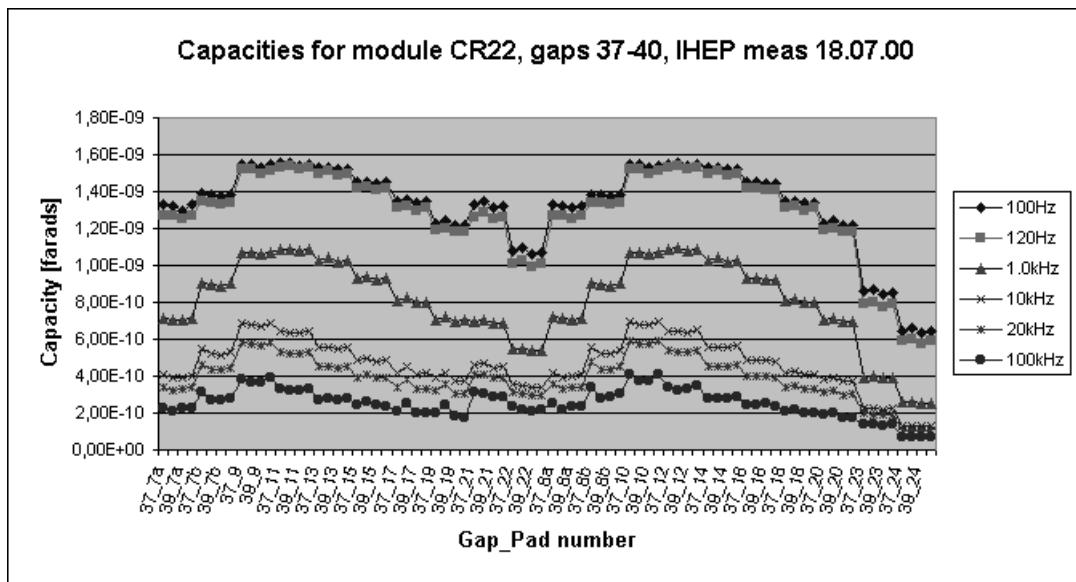


Рис. 8. Измерения емкостей ячеек в регистрирующих слоях с одинаковыми сопротивлениями ВРП.

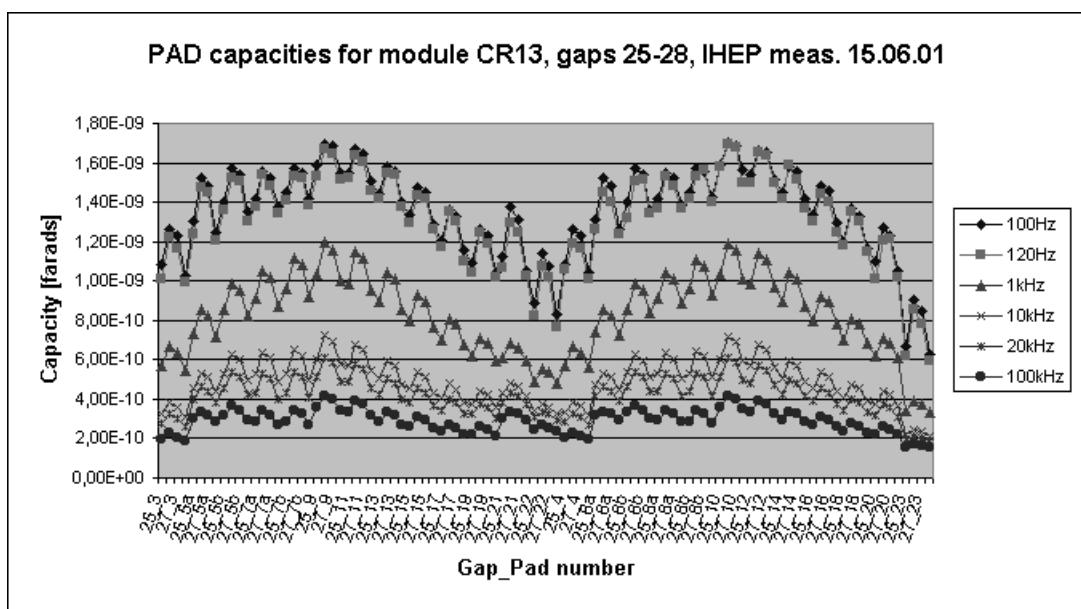


Рис. 9. Измерения емкостей ячеек в регистрирующих слоях с разными сопротивлениями ВРП.

Наблюдается прямо пропорциональная зависимость величины измеренной емкости от площади пэда и обратно пропорциональная зависимость от частоты и сопротивления ВРП ячеек. Для каждой четверки электродов одинаковой геометрии распределение сопротивлений ВРП слоев является зеркальным отражением распределения емкости ячеек тех же слоев (сравните [рис. 4 и 9](#)). При более внимательном изучении измеренных емкостей можно обнаружить неоднородности в удельном сопротивлении даже в пределах одного электрода.

Окончательное тестирование делается на полностью собранном модуле с установленной кабельной обвязкой, оно заключается в измерении емкостей со стороны сигнальных разъемов (см. [рис. 10](#)).

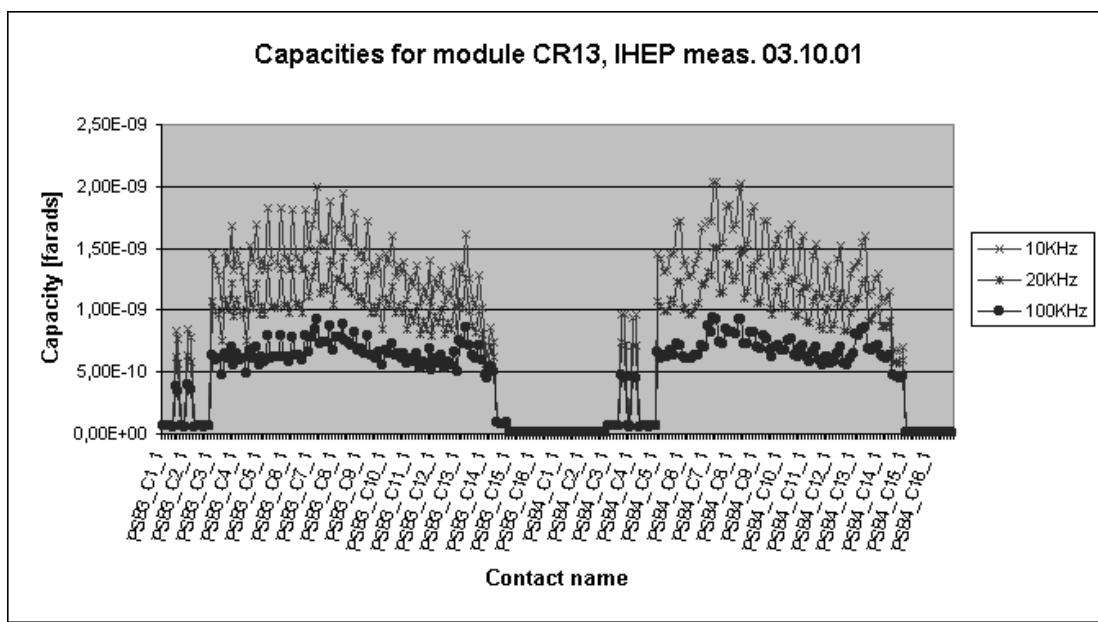


Рис. 10. Результаты измерения емкостей с контактов сигнальных разъемов.

Измерения емкостей в ИФВЭ проводятся на шести значениях частот от 100 Гц до 100 кГц. Для более детального рассмотрения высокочастотных составляющих на рис.10 представлена выборка из трех максимальных частот, имеющихся у нашего измерительного прибора. “Провалы” в распределениях емкостей, видимые на **рис. 10** по краям и в центре, соответствуют контактам, незадействованным или отсутствующим в данном типе модулей.

Этот вид измерений автоматизирован в наибольшей степени и максимально приближен к аналогичной процедуре, применяемой в ЦЕРНе. Одновременно подключаются 2 разъема по 8 каналов, их опрос происходит последовательно через сканер, затем следует переключение на другую пару разъемов и т. д. При этом нет прямого дублирования предыдущей процедуры индивидуального измерения емкостей, т. к. регистрирующие ячейки уже объединены в пары. К тому же, проверяется кабельная связь, требующая особой осторожности при установке. Как показывает опыт, именно на этом этапе выявляются различного рода проблемы (притом, что по отдельности все уже проверялось ранее).

Практически такой же тест, которым мы заканчиваем сборку модулей в ИФВЭ, производится после их доставки в ЦЕРН, но на более высоких частотах, так что данные ИФВЭ и ЦЕРНа дополняют друг друга, а их взаимная согласованность является дополнительным способом проверки правильности измерений.

Заключение

На основе имеющегося измерительного оборудования в ИФВЭ разработана и внедрена в эксплуатацию система контроля качества модулей адронного торцевого калориметра детектора АТЛАС. На момент подготовки данной работы было проведено тестирование 7-ми серийных модулей и 2-х специальных полумодулей, собранных в ИФВЭ. Методика показала себя достаточно эффективной: выявлено и оперативно устранено более 10 серьезных неисправностей, в основном обрывов на узких токопроводящих полосках, подвергающихся изгибам при сборке. Накоплен большой статистический материал, позволяющий сделать оценки электрических характеристик модулей и их компонентов.

Авторы выражают благодарность А.М.Зайцеву и А.Н.Сытину за поддержку работ по АТК, Н.Н.Антонову за помощь в процессе исследования и отладки модулей, М.С.Левицкому, А.А.Минаенко и А.Е.Кирюнину за полезные обсуждения.

Литература

- [1] ATLAS Technical Proposal for a General-Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider CERN/LHCC/94-43 (1994).
- [2] Liquid Argon Calorimeter, Technical Design Report, CERN/LHCC/96-41.
- [3] H.Wellisch and C.Oram, “Proposal for quality Control in the ATLAS End-cap Hadronic Calorimeter” (LARG Note 68 27.01.1997).

Рукопись поступила 13 мая 2002 года

Л.Л. Закамский., Л.Л Курчанинов., Г.Я. Митрофанов., А.М. Моисеев
Система контроля качества модулей адронного торцевого калориметра
детектора ATLAS.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 14.05.2002. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.
Печ.л 1.37. Уч.-изд.л. 1,1. Тираж 130. Заказ 88. Индекс 3649.
ЛР №020498 от 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2002-18, ИФВЭ, 2002
