

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В СТАНДАРТАХ AdvancedTCA И MicroTCA В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ ФИЗИКИ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В. А. Смирнов^{1,*}

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Рассматриваются примеры использования электроники в стандартах AdvancedTCA и MicroTCA в установках физики частиц высоких энергий. Электроника в новых стандартах построена на модульном принципе и обеспечивает высокоскоростную передачу данных и гибкость во взаимосвязях между модулями. Дано краткое описание основных положений, терминов и аппаратуры, используемых в новых стандартах. Электроника в стандартах AdvancedTCA и MicroTCA использована для модернизации и создания систем сбора данных экспериментальных установок ЦЕРН, Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (Батавия, США), Национальной ускорительной лаборатории SLAC (США). Она применяется для создания систем управления и контроля ускорительных комплексов DESY, GSI, установки European XFEL (Германия), установки European Spallation Source (Швеция), лабораторий KEK и J-PARC (Япония).

The review considers examples of using electronics in the AdvancedTCA and MicroTCA standards in high-energy particle physics facilities. The electronics in the new standards is built on a modular principle and provides high-speed data transfer and flexibility in the interconnections between modules. A brief description of the main provisions, terms, and equipment used in the new standards is given. Electronics in the AdvancedTCA and MicroTCA standards has been used to upgrade and create data acquisition systems for experimental facilities at CERN, the Fermi National Accelerator Laboratory (Batavia, USA), and the SLAC National Accelerator Laboratory (USA). It is used to create control and monitoring systems for accelerator complexes at the DESY and GSI laboratories, the European XFEL facility (Germany), the European Spallation Source facility (Sweden), and the KEK and J-PARC laboratories (Japan).

PACS: 7.05.Fb; 07.05.Hd; 07.05.Wr

ВВЕДЕНИЕ

К электронной аппаратуре в современных установках для проведения исследований в области физики частиц высоких и сверхвысоких энергий предъявляют высокие требования по пропускной способности передачи

* E-mail: vitsmirnov@jinr.ru

принимаемых с детекторов данных и по обеспечению быстрых связей между цифровыми электронными элементами, распределенными по установке. Во многих экспериментальных установках, созданных для исследований в физике частиц высоких энергий, в системах сбора данных используется электроника в стандарте VME. Однако в последние годы наметилась тенденция к использованию электроники в телекоммуникационных стандартах AdvancedTCA (АТСА) и MicroTCA (МТСА) [1–4]. Электроника в новых стандартах построена на модульном принципе и обеспечивает высокоскоростную передачу данных и гибкость во взаимосвязях между модулями. Эти стандарты позволяют создавать многовходовые компьютерные системы с программируемыми коммутационными модулями на линиях связи между компьютерами. Системы становятся намного компактнее, значительно уменьшается количество кабельных связей, а главное, значительно увеличивается производительность функционирования систем. В начале обзора приводится краткое описание основных положений, терминов и аппаратуры, используемых в новых стандартах. Далее рассматриваются примеры использования электроники в стандартах АТСА и МТСА для модернизации и создания систем сбора данных экспериментальных установок в физике частиц, а также для создания систем управления и контроля ряда ускорительных комплексов.

1. ОПИСАНИЕ AdvancedTCA

Спецификация стандарта AdvancedTCA (Advanced Telecommunications Computing Architecture) появилась в январе 2003 г. [5]. В ней представлено новое поколение стандартов телекоммуникационных вычислительных платформ открытой архитектуры. Стандарт АТСА разработан при участии более 100 компаний, производящих промышленное и телекоммуникационное оборудование. Общее руководство осуществляет компания PCIMG (производитель промышленных компьютеров на основе стандарта PCI). АТСА обеспечивает чрезвычайно сложную и надежную архитектуру управления системой, которая продолжает работать даже в случае сбоя отдельного модуля или подсистемы. Спецификации АТСА и МТСА и статьи, иллюстрирующие примеры применения этих стандартов, написаны на английском языке. В дальнейшем в работе будут использоваться сокращения терминов и элементов, принятые в этих спецификациях. Однако расшифровка сокращений будет дана на русском языке.

Базовая спецификация AdvancedTCA 3.0 определяет физические и электрические характеристики модуля, крейта и коммутационные соединения между модулями. В спецификации приводятся размеры крейта, описание линий связи объединительной кросс-панели, характеристики элементов питания и охлаждения, интерфейсы управления и электромагнитические характеристики модулей. Крейт высотой 12U предназначен для установки до 16 модулей (рис. 1, а). Существуют варианты крейтов

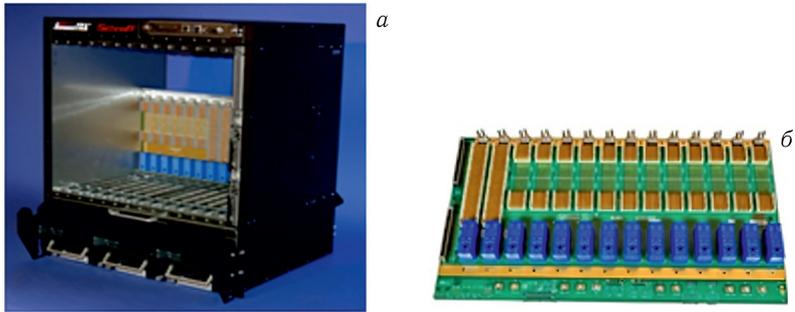


Рис. 1. Элементы крейта ATCA: а) крейт на 16 позиций; б) кросс-панель на 14 позиций

ATCA на меньшее количество модулей. Конструкция модулей позволяет устанавливать или удалять их на кросс-панели без отключения питания в крейте (FRU).

Кросс-панель обеспечивает высокий уровень надежности, поскольку нет активных компонентов, которые могут выйти из строя. Кросс-панель — это печатная плата с установленными на ней разъемами. Она определяет общую компоновку связей между контактами разъемов, расположение разъемов (высокоскоростных и питания), структуру ключей выравнивания для механической целостности разъемов и электрическую кодировку для поддержки различных типов плат. Кросс-панель обеспечивает возможность установки в крейт задних модулей, которые подключаются к разъему переднего модуля. На рис. 1, б показана кросс-панель с разъемами на 14 позициях.

Специализированные разъемы передают высокоскоростные сигналы. Разводка сигналов обеспечивает разнообразие способов соединения модулей между собой. Для передачи данных используются до пяти 80-контактных высокоскоростных разъемов Tuso/Erg1 NM-ZD 2,0 мм в каждой позиции кросс-панели. По одному разъему может передаваться 40 дифференциальных сигналов, а по пяти разъемам — 200 дифференциальных сигналов. 200 дифференциальных пар распределяются по отдельным интерфейсам передачи данных следующим образом: 64 пары для основного интерфейса, 120 пар для структурного интерфейса, 10 пар для интерфейса обновления и 6 пар для интерфейса сигналов синхронизации. В структуре передачи данных ATCA выделяют четыре вида интерфейсов: основной интерфейс, структурный интерфейс, интерфейс обновления и интерфейс сигналов синхронизации. Разводка сигналов на кросс-панели показана на рис. 2.

Спецификация ATCA определяет также топологию соединений на кросс-панели. Это может быть как многосвязная топология (рис. 3, а), так и соединение типа «двойная звезда» (рис. 3, б). В основном интерфейсе всегда используется соединение типа «двойная звезда» с выделением

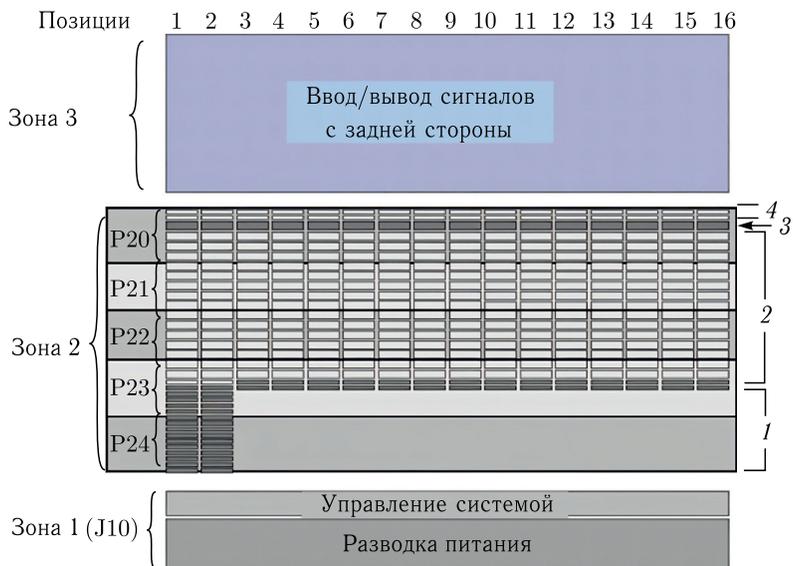


Рис. 2. Разводка сигналов на кросс-панели для 16 позиций: 1 — сигналы основного интерфейса; 2 — сигналы структурного интерфейса; 3 — сигналы интерфейса обновления; 4 — сигналы интерфейса синхронизации

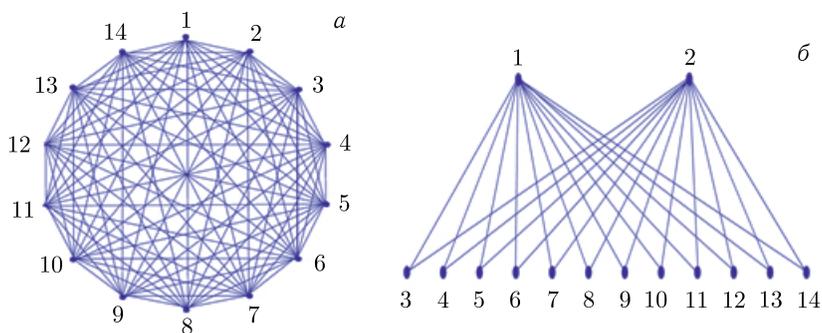


Рис. 3. Вид топологии соединений в крейте АТСА: а) многосвязная; б) «двойная звезда»

двух модулей концентраторов, располагаемых в позициях 1 и 2. Каждый концентратор по отдельности связан с оставшимися 14 модулями. Один канал основного интерфейса образуют четыре дифференциальных сигнала, способных поддерживать гигабитный стандарт 10/100/1000BASE T. Структурный интерфейс поддерживает как многосвязную топологию, так и соединения типа «двойная звезда» или две «двойные звезды».

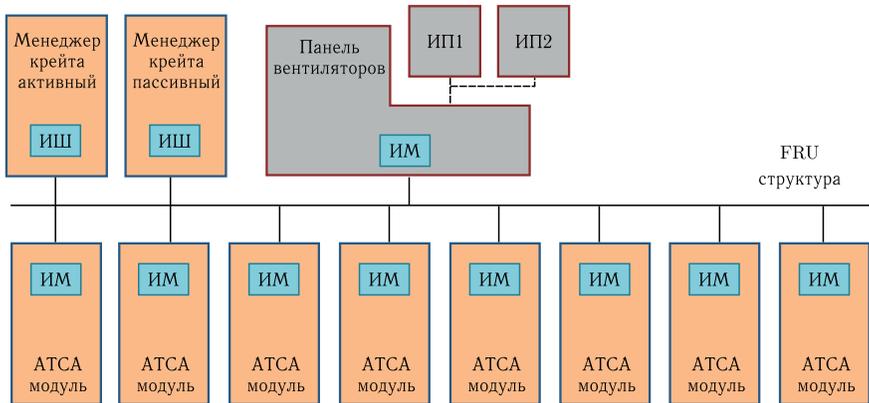


Рис. 4. Блок-схема крейта ATCA

Структурный интерфейс состоит из 15 каналов. Каждый канал образуют восемь дифференциальных сигналов.

Модуль ATCA имеет следующие размеры: высота 8U (355,6 мм), глубина 280 мм и ширина 30,48 мм. На задней стороне модуля размещены разъемы питания и высокоскоростные разъемы. На задней панели модуля выделены 3 зоны. В зоне 1 находятся разъемы для подачи к модулям питания (ИП1, ИП2) на -48 В постоянного тока и сигналов управления модулями со стороны менеджера крейта. Внутри каждого модуля находятся индивидуальные преобразователи напряжения. В зоне 2 располагаются высокоскоростные сигнальные разъемы типа Tусо/Erni НМ-ZD 2,0 мм. Назначение соединителей в зоне 3 определяется потребителем, обычно они используются для соединения с задними модулями, подключаемыми с противоположной стороны кросс-панели. Также в зоне 3 может располагаться специальная кросс-панель, обеспечивающая передачу сигналов, не определенных в спецификации ATCA.

Основными модулями крейта являются один или два менеджера крейта, которые осуществляют функции контроля и управления модулями. При обнаружении проблемы менеджер крейта может принять меры самостоятельно или сообщить о проблеме системному менеджеру. Это действие может быть простым, например, заставить вентиляторы работать быстрее, или более радикальным, например, выключить модуль. Каждый модуль и менеджер крейта содержат интерфейс связи с линиями управления крейта: ИШ для менеджера крейта и ИМ для модулей (рис.4).

2. ОПИСАНИЕ MicroTCA

Стандарт MicroTCA (Micro Telecommunications Computing Architecture) [6] появился в 2006 г. В этом стандарте в качестве модулей используются мезонинные модули АМС [7], применяемые в стандарте

АТСА. Модули объединены общей магистралью в рамках механического стандарта (крейта). Конструкция модулей позволяет устанавливать или удалять их на кросс-панели без отключения питания в крейте (FRU). Аппаратура в стандарте МТСА используется в оборонной и авиационной промышленности и в научных исследованиях. Использование МТСА при создании масштабных систем сбора данных, контроля и управления для крупных физических экспериментов и ускорителей частиц привело к модернизации стандарта, а в конечном итоге — к появлению современной модификации МТСА MicroTCA.4.

Минимальная система МТСА может состоять как минимум из одного модуля АМС, одного менеджера (МСН) и их взаимных соединений, а также систем питания, охлаждения и механической конструкции для размещения вышеупомянутых элементов. Типовая система МТСА состоит из двенадцати модулей АМС, одного или двух (один для резерва) МСН, модулей питания с резервированием и системы охлаждения (рис. 5). Все связи между элементами системы выполняет кросс-панель.

Крейт — это механическая конструкция, в которой размещаются все элементы системы. В крейте MicroTCA.4 существует возможность вставлять модули по направляющим как спереди, так и сзади (рис. 6).

На рис. 7 показан пример соединения заднего модуля с передним. У заднего модуля отсутствует соединение с кросс-панелью, а подключение происходит через дополнительный разъем.

Существует довольно большое разнообразие модулей АМС, производимых в промышленных масштабах (процессоры, модули памяти, модули ввода/вывода, аналогоцифровые преобразователи (АЦП), цифроаналоговые преобразователи (ЦАП), преобразователи временных интервалов в цифровой код (ВЦП) и мн. др.).

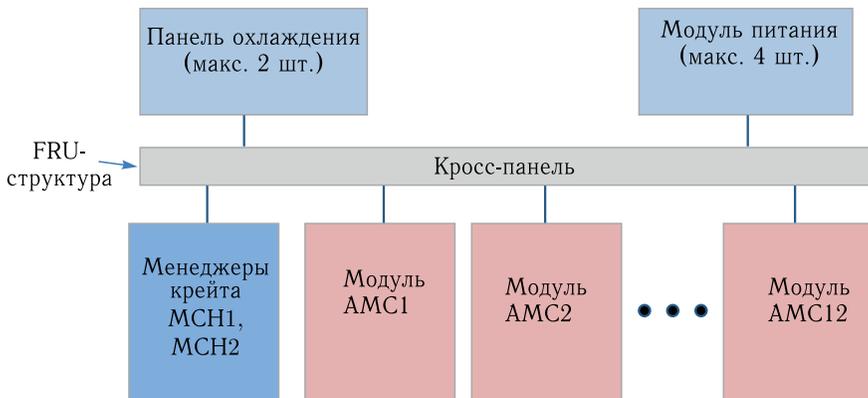


Рис. 5. Блок-схема крейта MicroTCA

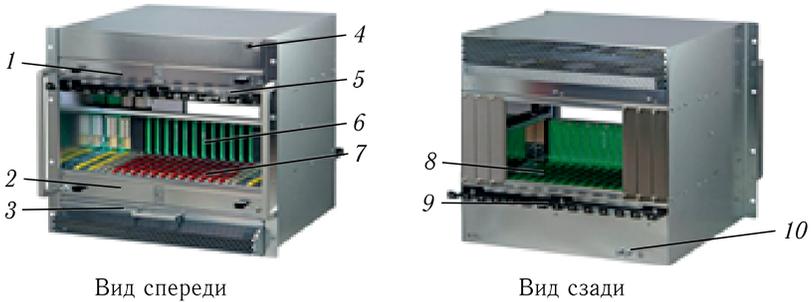


Рис. 6. Конструкция крейта MicroTCA.4: 1 — верхняя охлаждающая панель; 2 — нижняя охлаждающая панель; 3 — воздушный фильтр; 4 — ESD защита от электростатического разряда; 5 — кабельный лоток; 6 — кросс-панель; 7 — направляющие для модулей; 8 — направляющие для задних модулей; 9 — кабельный лоток; 10 — клемма заземления



Рис. 7. Схема соединения заднего модуля с передним в крейте МТСА.4

В крейт МТСА устанавливается кросс-панель, к которой подключаются модули АМС и другие элементы. Для подсоединения модулей к кросс-панели используются высокопроизводительные разъемы. Модули менеджера крейта обычно занимают одну или несколько позиций на кросс-панели. Каждый модуль АМС соединяется с кросс-панелью одинаковым образом. Для менеджера крейта МСН используется другой тип подсоединений, который обеспечивает индивидуальные соединения МСН со всеми модулями АМС. Эти разъемы оптимизированы для передачи высокоскоростных последовательных сигналов до 10 Гбит/с. Структура крейта поддерживает разные протоколы передачи данных, в том числе PCI Express, Ethernet и RapidIO. Это позволяет использовать различные типы АМС в одной системе.

Структура МСН формирует соединение модулей типа «звезда». Для образования сети типа «двойная звезда» требуются два МСН. В некоторых крейтах МТСА существуют дополнительные связи от каждой

позиции АМС к другим позициям АМС, что позволяет создавать дополнительные топологии соединений между модулями системы.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АППАРАТУРЫ МТСА ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА УСТАНОВКИ CMS (ЦЕРН)

Экспериментальная установка CMS (ЦЕРН) является одной из четырех исследовательских установок на Большом адронном коллайдере. Электронная аппаратура адронного калориметра CMS, регистрирующая данные взаимодействия встречных пучков частиц, состоит из электроники детектора и электроники первичной обработки. Электроника детектора расположена непосредственно на калориметре. Она регистрирует световые аналоговые сигналы со сцинтилляционных детекторов калориметра, преобразует их в электрические аналоговые сигналы, которые подаются на расположенные рядом АЦП и ВЦП. Далее цифровые данные преобразуются в последовательный код и поступают по оптическим линиям связи в модули электроники первичной обработки данных, которые расположены на значительном удалении от детектора за защитой от радиационного излучения. Аппаратура МТСА использовалась в качестве замены аппаратуры VME при модернизации электроники первичной обработки данных. Необходимость обновления была вызвана значительным увеличением светимости коллайдера и каналов регистрации с калориметра, что привело к увеличению объема данных, поступающих с детекторов калориметра, и необходимости выполнения более глубокой обработки данных, полученных во время каждого триггера установки CMS [8]. На рис. 8 показан один из крейтов электроники первичной обработки

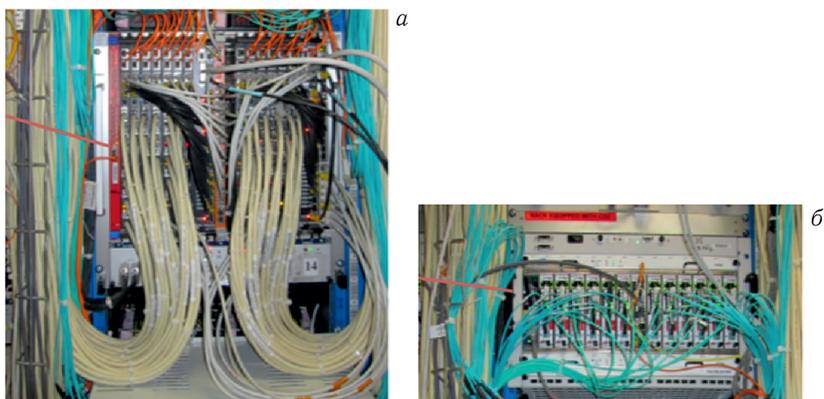


Рис. 8. а) Крейт VME с большим количеством подходящих к нему кабелей, который использовался до обновления; б) крейт МТСА, используемый после обновления

данных до обновления и после. Уже можно заметить, что количество кабелей, подводимых к крейту, и объем аппаратуры заметно уменьшились.

Электроника первичной обработки данных отвечает за вычисление предварительного триггера и за взаимодействие с системой триггеров 1-го уровня CMS. При выполнении условий триггера она отправляет данные в центральную систему сбора данных установки CMS. В одном типовом крейте МТСА (рис. 9) находятся менеджер крейта МСН, специализированный модуль АМС13 и 12 модулей mHTR. Модуль АМС13 занимает место второго менеджера крейта. Он, по сути, является модулем АМС и выполняет в крейте функции процессора и узла синхронизации. Модуль АМС13 на основе информации, полученной с 12 модулей mHTR, вычисляет предварительный триггер и пересылает его в систему сбора данных установки CMS. Модуль mHTR принимает данные в последовательном коде из электроники детекторов по 24 оптоволоконным линиям, преобразует их в параллельный код. Данные с индивидуальных башен калориметра суммируются и преобразуются в формат зарегистрированной энергии. Электроника первичной обработки данных состоит из 16 подобных крейтов МТСА [9].

В настоящее время идет подготовка к обновлению установки CMS. Обновление связано с очередной модернизацией Большого адронного коллайдера и, соответственно, со значительным увеличением светимости. Установку CMS нужно адаптировать к новым условиям [10]. При этом резко возрастает число каналов регистрации, а также возникает необходимость в значительном увеличении пропускной способности каналов передачи данных по всем детекторам установки. Система сбора данных адронного калориметра, созданная на основе стандарта

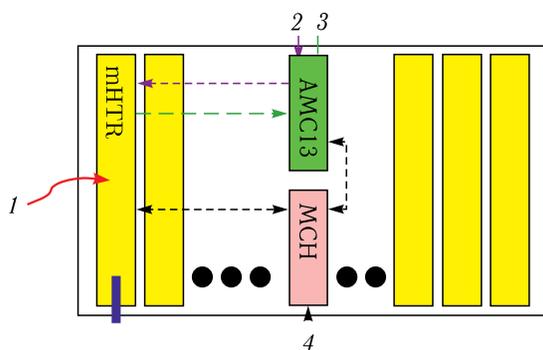


Рис. 9. Структура одного из крейтов электроники первичной обработки данных: 1 — последовательные сигналы из электроники детектора; 2 — сигнал синхронизации по всем системам Большого адронного коллайдера; 3 — передача данных в систему сбора данных установки CMS; 4 — связь с системами медленного контроля

MicroTCA, не справится с таким объемом данных. Во-первых, множество последовательных входных связей, приходящих от одного элемента калориметра (башни), необходимо обрабатывать как единое целое, а это потребует использования больших интегральных схем (программируемые вентиляльные матрицы ПЛИС), которым требуется как больше мощности, так и больше места на отдельных платах. Во-вторых, большое количество оптических разъемов требует места на передней панели модулей, что неосуществимо даже на платах AMC двойной ширины. Все это побудило принять решение о создании новой электроники первичной обработки данных, которая будет объединять детекторы HCal и ECal, на основе электроники в стандарте ATCA [11]. Объединенный детектор HCal и ECal получил название HGCal. В настоящее время работы по разработке новой электроники первичной обработки данных детектора HGCal проходят очень успешно. Это обстоятельство побудило руководство установки CMS использовать для всех детекторов CMS разработки, которые ведутся на детекторе HGCal.

Новая электроника первичной обработки данных детектора HGCal состоит из подсистемы DAQ, обеспечивающей сбор данных с электроники детекторов, подсистемы TPG, вырабатывающей упрощенный предварительный триггер, а также подсистем управления детектором (DCS) и безопасности (DSS). Подсистемы DAQ и TPG реализованы как две независимые подсистемы, которые находятся в отдалении от калориметра за защитой и имеют отдельные каналы для передачи данных от электроники детекторов к двум этим подсистемам. Однако эти подсистемы имеют много общих функций, и ядром электроники для двух систем будет общее семейство модулей в стандарте ATCA.

Основной задачей подсистемы DAQ является сбор данных с электроники детекторов и передача их в систему сбора данных установки CMS. Среди линий связи между детектором и модулями DAQ одни связи переносят регистрируемые данные, а другие линии используются для синхронизации и управления работой электроники детекторов со

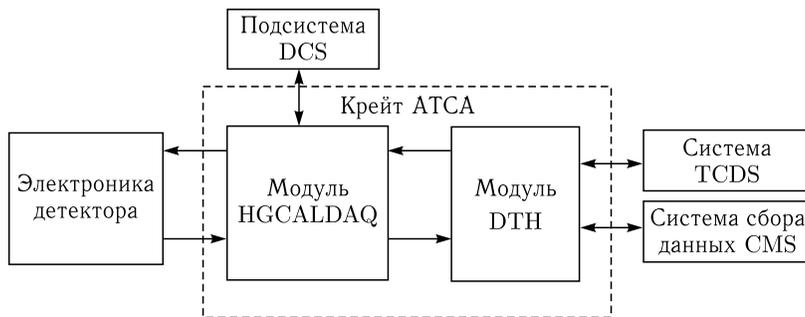


Рис. 10. Структура связей модулей крейта ATCA с внешними подсистемами

стороны DAQ. Подсистема DAQ получает также централизованные сигналы из коллайдера от систем распределения сигналов синхронизации и управления (TCDS), а также сигналы управления из системы сбора данных установки CMS. Подсистема DAQ также взаимодействует с DCS и системами конфигурации (рис. 10). В одной из двух центральных позиций каждого крейта ATCA располагается модуль концентратора синхронизации (DTH), который обеспечивает доступ подсистемы DAQ к центральной системе сбора данных и системе TCDS. Модули HGCAI занимают 12 позиций в крейте ATCA за пределами двух центральных позиций крейта. Стандарт ATCA допускает расход мощности до 400 Вт на плату модуля.

4. ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА В СТАНДАРТЕ МТСА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ MUON $g-2$ В НАЦИОНАЛЬНОЙ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИМ. Э. ФЕРМИ (БАТАВИЯ, США)

В эксперименте Муон $g-2$ проводятся измерения аномального магнитного момента мюона, когда поляризованный пучок положительных мюонов находится в накопительном кольце с однородным магнитным полем. Возникающие при распаде мюонов позитроны детектируются набором из 24 электромагнитных калориметров, расположенных вокруг накопительного кольца [12]. Для регистрации данных используется электронная аппаратура в стандарте МТСА. В каждом крейте находится 12 модулей АМС, являющихся преобразователями сигнала в цифровую форму. Как и в эксперименте CMS ЦЕРН, в 13-ю позицию каждого крейта устанавливается модуль АМС13, который отвечает за распределение сигналов синхронизации эксперимента, сигналов запуска и за сбор данных с каждого 5-канального преобразователя. Всего в системе используются 323 таких преобразователя. Система сбора данных состоит из 27 крейтов в стандарте МТСА.

5. ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА В СТАНДАРТЕ МТСА ДЛЯ ЕВРОПЕЙСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ (XFEL)

XFEL — самый крупный в мире лазер на свободных электронах [13]. Проект разработан исследовательским центром DESY (Германия). Лазерная установка длиной 3,4 км расположена на глубине от 6 до 38 м под землей и протянулась от лаборатории DESY в Гамбурге до окраины города Шенфельда. Лазер XFEL построен таким образом, чтобы релятивистские электроны синхронно вызывали рентгеновское излучение. При этом возникают рентгеновские импульсы со свойствами лазерного излучения. Для ускорения электронов используется сверхпроводящий линейный ускоритель с максимальной энергией 17,5 ГэВ. Электроны, двигаясь

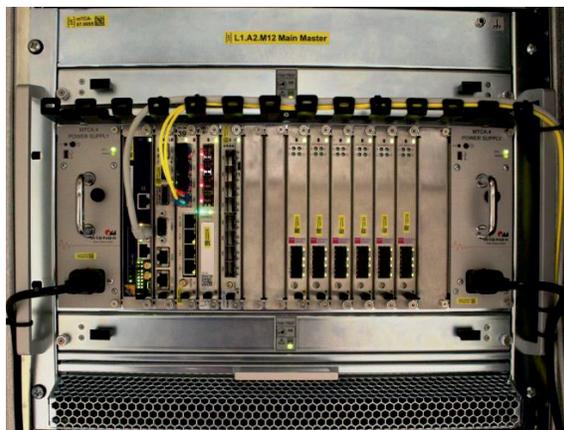


Рис. 11. Крейт МТСА.4 с модулями управления 16 резонаторами в двух криогенных модулях

по искривленным траекториям, излучают кванты в рентгеновском диапазоне. Ускорительная секция XFEL состоит из 800 сверхпроводящих резонаторов, которые размещены в 100 криогенных модулях. 25 радиочастотных станций используются для управления резонаторами. Каждый резонатор получает питание от одного 10-МВт клистрона.

Система управления каждой из 25 радиочастотных станций размещена в крейте в стандарте МТСА.4 (рис. 11). Каждому модулю АМС соответствует задний модуль RTM, соединенный с ним разъемом. Аналоговые сигналы с радиочастотной станции поступают в задние модули RTM, где они проходят первичную обработку и попадают в передние модули АМС. В этих модулях сигналы преобразуются в цифровой код, и при помощи логики, заданной в интегральные схемы ПЛИС, вычисляются частичные векторные суммы. Эти суммы отправляются через кросс-панель крейта в модуль АМС, выполняющий функцию главного контроллера. Главный контроллер суммирует поступающие данные и вычисляет сигналы управления 16 клистронами. Вся система управления содержит 25 крейтов в стандарте МТСА.4.

6. ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА В СТАНДАРТЕ МТСА В ПРОЕКТЕ РЕТРА IV (DESY, ГЕРМАНИЯ)

Проект РЕТРА IV направлен на создание самого мощного в мире источника синхротронного излучения [14]. Проект должен быть завершен в 2027 г. Основой проекта является накопительное кольцо длиной 2,3 км. В кольце будут установлены 788 датчиков положения пучка. Для измерения предполагается использовать электронную аппаратуру

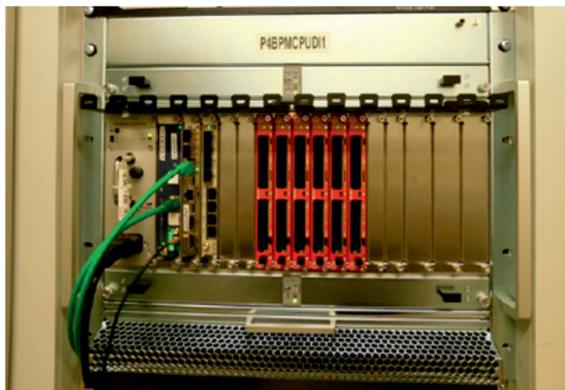


Рис. 12. Прототип измерительной системы на 2 датчика в крейте МТСА.4

в стандарте МТСА.4. Аналоговые сигналы с двух датчиков положения пучка приходят в задний модуль РТМ, где преобразуются в цифровой код. Модуль РТМ связан разъемом с модулем АМС, содержащим аппаратный процессор на основе интегральной схемы ПЛИС. Предполагается размещение в одном крейте МТСА.4 шести пар модулей для измерений с 8 датчиков положения пучка. В настоящее время изготовлен прототип измерительной системы на 2 датчика (рис. 12).

7. СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ НА ОСНОВЕ MicroTCA ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА FAIR

Ускорительный комплекс FAIR (Дармштадт, Германия) представляет собой систему ускорителей разных типов и предназначен для исследований элементарных частиц и физики атомного ядра, начиная с 2025 г. [15]. В настоящее время существует несколько подсистем сбора данных, выполненных в стандарте MicroTCA, которые охватывают диапазон измерений тока пучка, настройки ускорителей, определения положения и профиля пучка. Был создан специализированный модуль АМС, который обеспечивает сигналами синхронизации все измерительные подсистемы. Это позволяет сопоставлять данные из распределенных систем сбора данных в масштабе наносекунд.

Подготовлен испытательный стенд для измерения положения пучка, работающий с 18 датчиками положения пучка. На рис.13 показана измерительная подсистема, выполненная из модулей в стандарте МТСА, которая принимает и обрабатывает сигналы с 18 датчиков положения пучка. В крейте находятся 5 модулей АМС, в каждом содержится по два четырехканальных АЦП на 16 разрядов, имеющих возможность проводить до 250 млн измерений в секунду. Существует также под-



Рис. 13. Измерительная подсистема на основе крейта в стандарте MTCA.4 для измерения положения пучка с 18 датчиков

система MTCA, предназначенная для измерений интенсивности пучка и определения количества и длительности сгустков пучка.

8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНИКИ В СТАНДАРТЕ ATCA В НАЦИОНАЛЬНОЙ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ SLAC (США)

Платформа SLAC RCE является системой сбора данных общего назначения [16]. Она реализована на модуле ATCA и получила название кластер на плате (COB). Ядром системы является конфигурируемый под определенную задачу кластерный элемент, логика которого закодирована в микросхеме ПЛИС. Кластерный элемент установлен на специальных дочерних платах COB. Он имеет 12 двунаправленных высокоскоростных связей, каждая из которых поддерживает последовательную передачу данных с внешним устройством со скоростью до 12 Гбит/с. Модуль COB размещается в крейте в стандарте ATCA, объединительная кросс-панель которого обеспечивает многосвязную топологию соединений.

В одном модуле ATCA находится 9 кластерных элементов. 8 из них предназначены для обработки данных (узлы обработки), а оставшийся элемент управляет взаимными соединениями и распределением сигналов синхронизации (узел передачи данных). Узлы обработки расположены парами на дочерних платах, которые называются модулями обработки данных. Таким образом, на одном модуле ATCA находятся 4 модуля обработки данных. Данные физических экспериментов принимаются каждым узлом обработки по одному или нескольким высокоскоростным последовательным каналам с использованием заднего модуля (RTM). Каждый узел обработки поддерживает 12 двунаправленных высокоскоростных каналов, а всего COB поддерживает 96 высокоскоростных каналов. Специфика заднего модуля RTM определяется конкретным экспериментом,



Рис. 14. Модуль ATCA — кластер на плате COB

являясь, по сути, адаптером разъемов и преобразователем сигналов (оптических, электрических), приходящих от детектора. На рис. 14 показан модуль ATCA — кластер на плате COB.

На основе платформы SLAC RCE была усовершенствована система сбора данных для сверхпроводящего линейного ускорителя рентгеновского лазера LCLS-II (SLAC) [17] и для детектора KOTO в японском протонном ускорительном комплексе J-PARC [18].

LCLS-II (SLAC) — это рентгеновский лазер на свободных электронах, который основан на сверхпроводящем линейном ускорителе непрерывного действия с энергией 4 ГэВ. Расстояние между пучками составляет 1 мкс. Лазер способен поставлять потребителям как мягкое, так и жесткое рентгеновское излучение. Платформа SLAC RCE на основе крейта в стандарте ATCA позволяет достичь требуемой производительности лазера. В модули крейта приходят данные с детекторов положения пучка. Модули крейта ATCA измеряют положение пучка непосредственно во время его движения в ускорителе. Аналоговый задний модуль RTM связан с детекторами положения пучка. Он имеет четыре канала обработки, узел калибровки и распределитель тактовой частоты для всех тактовых генераторов для цифровых последовательных интерфейсов АЦП (JESD). Интерфейс JESD обеспечивает эффективную передачу данных между высокоскоростными аналогоцифровыми преобразователями и схемами ПЛИС. Измерение аналоговых сигналов с детекторов положения пучка осуществляется со скоростью 300 МГц. Обработка данных выполняется модулями платформы SLAC RCE.

Целью эксперимента KOTO является обнаружение и измерение редкого распада каонов. Аналоговые сигналы из 3000 каналов калориметра CsI и 1000 каналов вето-детектора преобразуются в цифровой вид и сохраняются внутри конвейера глубиной 4 мкс. Данные детекторов

подаются на 14-разрядные платы АЦП 125 МГц, находящиеся непосредственно на детекторе. Данные АЦП по оптоволоконным линиям связи 2 Гбит/с поступают в модули RTM крейта ATCA платформы SLAC RCE, в которой осуществляется определение триггера второго уровня для выборки необходимых событий.

9. ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА В СТАНДАРТЕ MTCA ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА CANDLES (ОСАКА, ЯПОНИЯ)

Эксперимент CANDLES [19] проводится в лаборатории ядерных исследований Университета Осаки. Установка находится на глубине 2700 м. В эксперименте исследуется очень редкое явление — безнейтринный двойной бета-распад. В установке используется 96 кубических кристаллов CaF_2 с размерами ребра куба 10 см. Эти кристаллы погружены в контейнер, содержащий 2000 л жидкого сцинтиллятора. Излучение сцинтиллятора регистрируют 62 ФЭУ.

Схематическое изображение системы сбора данных, в которой используются крейты и модули в стандарте MTCA, приведено на рис. 15. В 4 крейтах MTCA 37 модулей АМС, каждый содержит двухканальный быстрый АЦП (FADC). В каждом крейте имеется модуль MCH. В системе используется модуль в стандарте NIM, который на схеме обозначен как Master module. Он отвечает за распределение сигналов синхронизации и прием сигналов запуска (trigger) и сигналов заня-

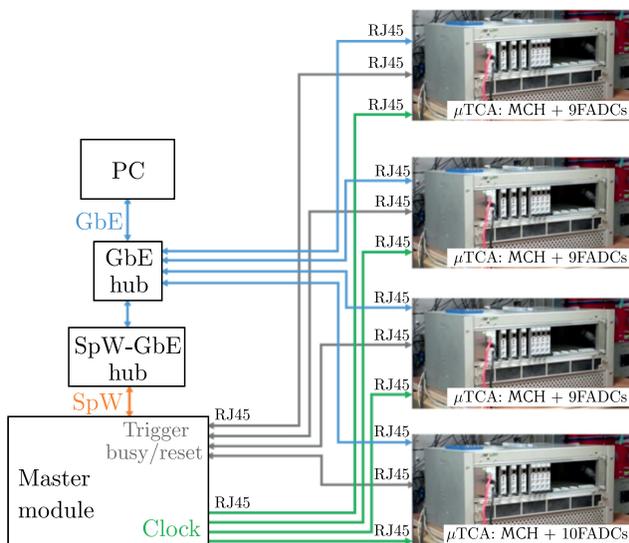


Рис. 15. Схематическое изображение системы сбора данных в эксперименте CANDLES

то/сброс (busy/reset). Модуль МСН содержит три микросхемы ПЛИС: одна ПЛИС является мостом между сетями Ethernet и SpaceWire, вторая ПЛИС обеспечивает выработку сигнала запуска, третья ПЛИС — роутер сети SpaceWire. Эти 3 микросхемы обеспечивают передачу данных по сети SpaceWire–Ethernet, распределение сигналов синхронизации, прием локальных сигналов запуска и трансляцию глобального сигнала запуска. Сбор данных со всех крейтов и запись необходимых параметров в крейты осуществляет компьютер (PC).

10. ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА В СТАНДАРТЕ МТСА ДЛЯ EUROPEAN SPALLATION SOURCE (ESS)

ESS — это европейский международный научно-исследовательский центр [20], использующий мощный источник нейтронов, который работает с 2022 г. в шведском городе Лунде. Источником нейтронов является ускорительный комплекс, где нейтроны генерируются во время столкновения ускоренных протонов с вольфрамовой мишенью. Источником протонов является линейный сверхпроводящий ускоритель длиной 600 м, который работает в импульсном режиме, ускоряя сгусток протонов 14 раз в секунду. Энергия протонов на выходе 2 ГэВ. Нейтроны после мишени замедляются и разделяются на 22 потока холодных и тепловых нейтронов.

Основные электронные системы, обеспечивающие управление, контроль параметров и сбор данных с датчиков подсистем линейного ускорителя, выполнены в стандарте МТСА.4 [21, 22]. Всего для работы развернуто более 300 систем. Системы осуществляют выполнение следующих задач: контроль тока и положения пучка, измерение эмиттанса, диагностика радиочастотных узлов, определение условий для блокировки пучка ускорителя и синхронизация систем. При создании систем используется два вида крейтов — МТСА 9U и 3U (рис. 16). В крейте 9U располагается до 12 модулей АМС и один задний модуль RTM, 2 модуля менеджера

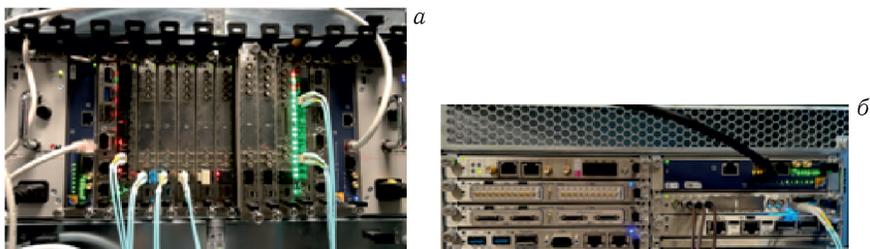


Рис. 16. Примеры крейтов МТСА, используемых при создании систем управления, контроля параметров и сбора данных в ESS: а) 9U; б) 3U

крейта MCH, 4 модуля питания. Кросс-панель поддерживает топологию сети «двойная звезда».

В системах используется большое разнообразие модулей АМС как коммерчески доступных, так и специализированных для выполнения задач ESS: процессорные модули, модули с микросхемами ПЛИС, различные преобразователи аналоговых сигналов в цифровой код, входные и выходные регистры и т. п. В зависимости от специфики выполняемой задачи разные системы содержат разный набор модулей. Все системы образуют сеть ESS.

11. ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА В СТАНДАРТЕ MTCA ДЛЯ ЛАБОРАТОРИИ КЕК (ЯПОНИЯ)

В 2023 г. на источнике синхротронного излучения (КЕКРФ 2,5 ГэВ) проведена замена системы управления для узла радиоэлектроники. Старая система состояла из аналоговых модулей, а в новой системе используются цифровые модули в стандарте MTCA.4 [23]. Узел радиоэлектроники кольца ускорителя имеет четыре клистрона, которые подают мощность в четыре резонатора кольца. Новая система позволяет улучшить как ремонтпригодность, так и производительность узла радиоэлектроники, а также определить фазу пучка.

Новая система управления для узла радиоэлектроники размещена в крейте MTCA.4. В нем находится один модуль менеджера крейта MCH, шесть пар модулей АМС и RTM и один модуль eRTM. Модуль MCH связан с внешним компьютером. Четыре пары модулей АМС и RTM используются для управления клистрономы. Оставшиеся две пары отслеживают отраженные сигналы от двух станций узла радиоэлектроники, они называются модулями быстрой блокировки. Модуль eRTM вырабатывает тактовый сигнал, образуемый из основного радиочастот-

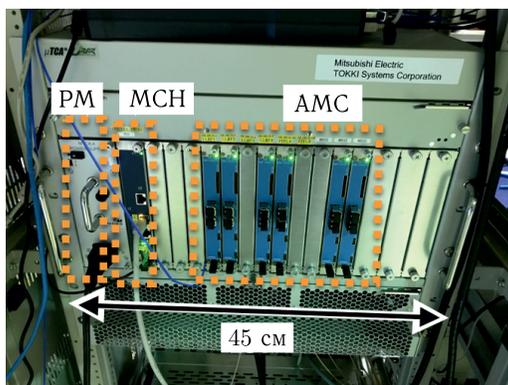


Рис. 17. Новая система узла радиоэлектроники

ного сигнала, и распределяет его на каждый модуль АМС. Цель новой конструкции системы управления узла радиоэлектроники — достижение стабильности напряжения резонатора в пределах $\pm 0,1\%$ по амплитуде и $\pm 0,1^\circ$ по фазе соответственно. На рис. 17 показана новая система узла радиоэлектроники.

12. ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА В СТАНДАРТЕ МТСА ДЛЯ ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА J-PARC (ЯПОНИЯ)

Система управления узла радиоэлектроники линейного ускорителя на протонном ускорительном комплексе J-PARC [24, 25] первоначально была создана на основе электроники в стандарте VME, которая в дальнейшем была заменена на электронику в стандарте MicroTCA.

В линейном ускорителе J-PARC используются датчик тока пучка, датчик фазы пучка и датчик положения пучка. Новая система управления позволяет лучше контролировать импульс пучка. Для управления клистроном резонатора был разработан новый дигитайзер сигналов в стандарте МТСА. Он позволяет контролировать структуру импульса пучка линейного ускорителя для того, чтобы добиться стабильной работы с более низкими потерями для всех интенсивностей в J-PARC. Модуль АМС содержит восемь 16-разрядных АЦП, работающих на скорости 370 млн выборок в секунду и с полосой пропускания 800 МГц, а также два ЦАП. АЦП, связанные по постоянному току, измеряют сигналы датчиков тока и фазы пучка. АЦП, связанные по переменному току, измеряют 324-МГц радиочастотные сигналы от датчиков положения пучка. В заднем модуле

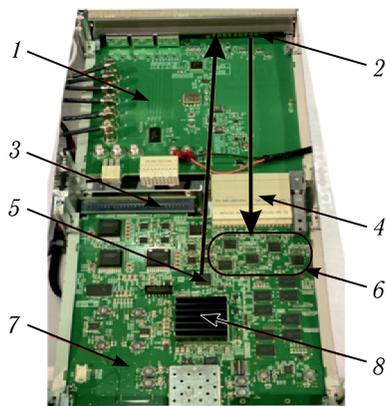


Рис. 18. Дигитайзер сигналов с датчиков пучка в стандарте МТСА: 1 — задний модуль RTM; 2 — разъем радиочастотного сигнала; 3 — разъем объединительной кросс-панели; 4 — соединительный разъем; 5 — узел ЦАП; 6 — узел АЦП; 7 — модуль АМС; 8 — микросхема ПЛИС



Рис. 19. Крейт MTCA для управления клистрономы линейного ускорителя J-PARC

RTM находится узел оптической связи, цифровой вход/выход и сетевой разъем. Модули АМС и RTM соединены разъемом (рис. 18). В одном крейте MTCA располагается шесть дигитайзеров, которые используются для управления клистрономы (рис. 19).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем обзоре рассматриваются возможности использования электроники в телекоммуникационных открытых модульных стандартах AdvancedTCA и MicroTCA для создания систем сбора данных экспериментальных установок, работающих в области физики частиц высоких и сверхвысоких энергий, и систем управления и контроля ускорительных комплексов. Дано краткое описание стандартов, где рассматриваются топологии связей модулей через высокоскоростную объединительную кросс-панель. Один канал связи стандарта ATCA образуют четыре дифференциальных сигнала, способных поддерживать гигабитный стандарт 10/100/1000BASE T. Связи между модулями в стандарте MTCA оптимизированы для передачи высокоскоростных последовательных сигналов до 10 Гбит/с. Структура крейта MTCA поддерживает разные протоколы передачи данных, в том числе PCI Express, Ethernet и RapidIO. Рассмотрены примеры использования электроники в стандартах AdvancedTCA и MicroTCA. Электроника в стандарте ATCA в основном используется или планируется к использованию в больших физических центрах: ЦЕРН и Национальной ускорительной лаборатории SLAC. Электроника в стандарте MTCA нашла широкое применение для создания современных

систем контроля и управления в ускорительных комплексах Германии, Швеции и Японии. Большинство применений электроники в стандарте МТСА приходится на создание систем контроля и управления узлов радиоэлектроники линейных ускорителей. Во многих случаях электроника в стандарте МТСА заменяет старые системы, выполненные в стандарте VME. Ряд примеров использования электроники в стандарте МТСА приведен для ускорительных комплексов, находящихся на стадии создания, что показывают актуальность этого стандарта для будущих применений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Larsen R. S.* PICMG xTCA Standards Extensions for Physics: New Developments and Future Plans. SLAC-PUB-14182. SLAC, 2010. 7 p.
2. *Jezynski T., Larsen R. S., Le Du P.* ATCA/mTCA for Physics // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 623. P. 510–512.
3. *Di Cosmo M., Bobillier V., Haas S. et al.* Evaluation Results of xTCA Equipment for HEP Experiments at CERN // J. Instrum. 2013. V. 8. P. C12015-8.
4. *Bobillier V., Haas S., Joos M. et al.* MicroTCA and AdvancedTCA Equipment Evaluation and Developments for LHC Experiments // J. Instrum. 2016. V. 11. P. C02022-9.
5. AdvancedTCA PICMG 3.0 Short Form Specification. PCI Industrial Computers Manufacturers Group (PICMG). 2003; https://indico.cern.ch/event/119030/attachments/61294/88092/PICMG_3_0_Shortform.pdf.
6. Micro Telecommunications Computing Architecture Short Form Specification. PCI Industrial Computers Manufacturers Group (PICMG). 2006; https://www.picmg.org/wp-content/uploads/MicroTCA_Short_Form_Sept_2006.pdf.
7. AMC.0 R2.0 Short Form Specification. PCI Industrial Computers Manufacturers Group (PICMG). 2006; https://www.picmg.org/wp-content/uploads/AMC.0_R2.0_Short_Form.pdf.
8. *CMS Collab.* CMS Technical Design Report for the Phase 1 Upgrade of the Hadron Calorimeter. CERN-LHCC-2012-015, CMS-TDR-010. 2012. 185 p.
9. *Whitbeck A., Hirschauer J. (CMS Collab.).* The CMS Central Hadron Calorimeter DAQ System Upgrade // J. Instrum. 2015. V. 10. P. C05019-155.
10. *CMS Collab.* The Phase-2 Upgrade of the CMS Endcap Calorimeter: Technical Design Report: CMS-TDR-019. CERN, 2018. 366 p.; <https://cds.cern.ch/record/2293646/files/CMS-TDR-019.pdf>.
11. *CMS Collab.* The Phase-2 Upgrade of CMS Data Acquisition and High Level Trigger. Technical Design Report. CERN-LHCC-2021-007, CMS-TDR-022. 2021. 378 p.; <https://cds.cern.ch/record/2759072/files/CMS-TDR-022.pdf>.
12. *Sweigart D. A.* A New MicroTCA-Based Waveform Digitizer for the Muon g–2 Experiment. FERMILAB-CONF-16-599. Fermilab, 2016. 3 p.
13. *Branlard J., Ayvazyan G., Ayvazyan V. et al.* MTCA.4 LLRF System for the European XFEL // Proc. 20th Intern. Conf. “Mixed Design of Integrated Circuits and Systems” (MIXDES 2013), Gdynia, Poland, 2013. P. 109–112.
14. *Kube G., Duhme H.-T., Lamaack J. et al.* A MTCA Based BPM-System for PETRA IV // Proc. 12th Intern. Beam Instrumentation Conf. (IBIC 2023), Saskatoon, Canada, Sept. 10–14, 2023. JACoW Publ., 2023. P. 19–23.

15. *Hoffmann T., Bräuning H., Geißler R. et al.* Status of the MicroTCA Based Beam Instrumentation DAQ Systems at GSI and FAIR // Proc. 19th Intern. Conf. Accel. Large Exp. Phys. Control Syst. (ICALEPCS2023), Cape Town, South Africa, Oct. 2023. JACoW Publ., 2023. P. 239–243.
16. *Herbst R., Claus R., Freytag M. et al.* A General Purpose ATCA Based Data Acquisition System. SLAC-Pub-16182. SLAC, 2014. 4 p.
17. *Young A., Claus R., D'Ewart J.M. et al.* Design of LCLS-II ATCA BPM System // Proc. 8th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC2017), Copenhagen, Denmark, May 2017. JACoW Publ., 2017. P. 477–479.
18. *Tecchio M., Beechert J., Campbell M. et al.* The Upgrade for the Data Acquisition System of the KOTO Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 824. P. 365–366.
19. *Khai B.T., Ajimura S., Kanagawa K. et al.* MicroTCA DAQ System and Parallel Reading in CANDLES Experiment 2018 // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2019. V. 66, No. 7. P. 1174–1181.
20. *Christensen M.J., Shetty M., Nilsson J. et al.* Software-Based Data Acquisition and Processing for Neutron Detectors at European Spallation Source — Early Experience from Four Detector Designs // J. Instrum. 2018. V. 13. P. T11002.
21. *Farina S., Lee J.H., Martins J.P.S. et al.* MicroTCA Generic Data Acquisition Systems at ESS // Proc. 16th Intern. Conf. Accel. Large Exp. Control Syst., Barcelona, Spain, Oct. 2017. JACoW Publ., 2018. P. 118–124.
22. *Chicken F., Jamroz J.J., Martins J.P.S.* Standard Development of MicroTCA at the European Spallation Source // Proc. 19th Intern. Conf. Accel. Large Exp. Control Syst., Cape Town, South Africa, Oct. 2023. JACoW Publ., 2023. P. 1238–1241.
23. *Naito D., Yamamoto N., Takahashi T. et al.* Commissioning of the Digital LLRF System at the KEK Photon Factory 2.5 GeV Ring // Proc. 15th Intern. Part. Accel. Conf., Nashville, USA, May 2024. JACoW Publ., 2024. P. 3442–3445.
24. *Tamura F., Sugiyama Y., Yoshii M. et al.* Development of Next Generation LLRF Control System for J-PARC Rapid Cycling Synchrotron // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2019. V. 66, No. 7. P. 1242–1248.
25. *Tamura F., Sugiyama Y., Yoshii M. et al.* Commissioning of the Next-Generation LLRF Control System for the Rapid Cycling Synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex // Nucl. Instr. Meth. A. 2021. V. 999. P. 165211–11.