

УДК 681.5.08, 681.518.3, 681.518.5

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ УСКОРИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В. Р. Козак, Э. А. Купер

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11
E-mail: kozak@inp.nsk.su*

Рассмотрены аппаратные средства, широко применяемые для построения систем автоматизации электрофизических установок. Эти устройства стали основой нижнего уровня автоматизации установок, создаваемых Институтом ядерной физики СО РАН, как в самом Институте, так и в других научных центрах. Обсуждаются требования к таким средствам, описываются особенности схемотехники и функциональные возможности. Рассматриваются некоторые практические применения.

Ключевые слова: система управления, электрофизическая установка, автоматизация, контроллеры, CANbus.

Введение. Институт ядерной физики (ИЯФ) СО РАН проектирует и создаёт электрофизические установки как для фундаментальных исследований, так и для прикладных работ. Это ускорительно-накопительные комплексы, лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), источники синхротронного излучения, ускорительные масс-спектрометры, установки электронно-лучевой сварки и многие другие. Такие установки являются уникальными, большая часть систем и компонентов проектируется и производится для каждой установки индивидуально.

Очевидно, что одна из важных систем данных установок — система управления. В ИЯФ СО РАН системы автоматизации электрофизических установок традиционно базируются на собственных разработках. В 1970–90-е годы аппаратной основой систем автоматизации являлись магистрально-модульные системы. Для отечественных экспериментальных установок применялся стандарт КАМАК, расцвет которого пришёлся на 1980-е годы. В тот период в Институте ядерной физики был разработан широкий спектр КАМАК-модулей, позволявший решать практически все реальные задачи автоматизации физических установок.

На этапе доминирования магистрально-модульных стандартов описанные системы обслуживались крейтами с модулями узкой специализации: аналого-цифровые преобразователи, коммутаторы аналоговых сигналов, регистры ввода/вывода и т. д. При проектировании системы подбиралось необходимое сочетание устройств.

В настоящее время использование какой-либо магистрально-модульной системы (КАМАК, VME, сРСІ и др.) в большинстве задач автоматизации ускорительных установок выглядит не столь очевидным, как это было в 1980-е годы. Электронное устройство, которое требовало целой печатной платы, сегодня реализуется одной–двумя микросхемами. Сопровождение такого устройства параллельным интерфейсом, контроллером, крейтом и аналоговыми трассами не выглядит оправданным. Более привлекательным представляется эти устройства встраивать непосредственно в управляемую аппаратуру (источники питания, ВЧ-генераторы и т. п.), а с управляющей ЭВМ соединять их недорогим сетевым интерфейсом. К 2000-му году потребности новых проектов [1, 2] инициировали пересмотр прежних технологий автоматизации, тем более что в 1990-х годах электронная промышленность создала предпосылки для нового шага разработчиков в этом направле-

нии. Широкая гамма однокристальных микропроцессоров, недорогие сетевые интерфейсы, высокая функциональная насыщенность микросхем — всё это позволило создать аппаратуру массовой автоматизации нового поколения.

Цель данной публикации — представить разработку набора многофункциональных устройств управления и контроля для построения систем автоматизации ускорительных установок.

Требования к аппаратным средствам систем управления. Рассмотрим требования к аппаратным компонентам систем управления электрофизическими установками на примере ускорительных комплексов. Радиотехническое оборудование таких установок состоит из следующих основных систем.

1. Система электропитания магнитных элементов (поворотных магнитов, линз и корректирующих магнитов) включает в себя управляемые источники тока с выходным током от 1 А до 10 кА со стабильностью от 1 до 0,001 %. Каждый источник тока, как правило, управляется напряжением от цифроаналогового преобразователя соответствующей точности. Кроме того, для надёжной работы установки необходимо контролировать реальную величину выходного тока с аналогичной точностью, а также напряжение на нагрузке. Во многих случаях требуются ещё и дискретные сигналы (индикатор срабатывания защиты устройства, управление включением источника и т. п.). Количество каналов управления для магнитной системы обычно составляет 50–1000, а измерительных каналов в 2–4 раза больше.

2. Импульсные системы содержат источники импульсного тока для питания элементов электронно-оптических каналов, предназначенных для транспортировки пучков, инфлекторно-дефлекторные системы, инжекторы и т. п. Для обслуживания таких систем требуются те же цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи с точностью от 1 до 0,01 %, измерители импульсных сигналов (точные значения в определённый момент времени либо осциллограммы), генераторы и измерители временных интервалов с разрешением от 50 нс (для электронно-оптических каналов) до сотен пикосекунд (для инфлекторно-дефлекторных каналов), дискретные каналы ввода и вывода. Количество каналов управления в этой системе обычно не превышает 200, а каналов контроля — 500.

3. Высокочастотная система — это генераторы ВЧ-мощности, которые для обслуживания требуют примерно те же устройства управления и контроля, что и импульсные источники.

4. Технологические системы выполняют измерения температуры различных элементов установки, вакуума, уровня радиации. Для их обслуживания требуются преимущественно измерительные каналы невысокой точности, но их количество составляет сотни и тысячи.

5. Системы диагностики пучков на ускорительно-накопительных комплексах чрезвычайно разнообразны. Измеряются заряд и положение центра тяжести сгустка частиц, горизонтальный, вертикальный и продольный профили, энергия и т. д. Общей особенностью электроники, используемой в системах диагностики пучков, является работа с очень широким частотным спектром — от медленно изменяющихся напряжений до сигналов оптического диапазона.

6. Система синхронизации, организующая временные диаграммы для большинства подсистем экспериментальной установки.

Технические решения. Основой нового поколения аппаратных средств автоматизации предложено сделать многофункциональные устройства с оптимальным набором ресурсов, встраиваемые в управляемое оборудование и снабжённые сетевым интерфейсом. Важным достоинством такой архитектуры является ликвидация множества внешних соединений между различными устройствами и, как следствие, значительное повышение надёжности системы автоматизации, существенное снижение эксплуатационных затрат.

Наиболее востребованными ресурсами аппаратуры автоматизации являются аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, регистры дискретного ввода/вывода, генераторы временных интервалов, мультиплексоры аналоговых сигналов, измерители временных интервалов, преобразователи код—скважность.

Однако даже при беглом рассмотрении становится ясным, что большая часть радиотехнических устройств электрофизических установок может обслуживаться небольшим набором универсальных контроллеров, обладающих всеми требуемыми ресурсами в разумном объёме. Например, система управления лазера на свободных электронах NovoFEL [3] содержит около 500 каналов управления и около 1700 измерительных каналов. Большая часть каналов управления и контроля обслуживает магнитную систему, которая имеет в своём составе 390 магнитных элементов (линзы, корректоры и пр.), получающих питание от 390 источников тока, что требует 390/780 каналов управления/контроля. Таким образом, до 80 % этих каналов может быть реализовано стандартизованными устройствами, ориентированными на управление источниками питания. Рассмотренные устройства, как показано выше, закрывают большую часть потребностей и других ускорительных систем. Такие блоки должны включать в свой состав 1–8 цифроаналоговых каналов, 4–32 аналого-цифровых канала и по 4–8 дискретных входов и выходов. Наличие микроконтроллера на плате даёт возможность реализовать высокоуровневые функции.

При создании набора аппаратных средств автоматизации решались следующие задачи:

- формирование и оптимизация номенклатуры устройств;
- определение оптимального набора унифицированных функций устройств;
- анализ возможных схемных решений и архитектуры построения устройств в целях выработки универсальных решений.

В качестве сетевого интерфейса нижнего уровня в научных центрах используются самые разные стандарты: Ethernet, CANbus, RS-485 — с каким-либо высокоуровневым протоколом обмена [4–6]. Выбор интерфейса зависит от множества факторов, как объективных, так и субъективных. Для автоматизации систем питания и различных технологических систем электрофизических установок в качестве сетевого интерфейса выбран CANbus, что обусловлено известными достоинствами стандарта: высокой надёжностью, детерминированным временем доставки сообщений, растущей популярностью этого стандарта в мировых физических центрах.

Наиболее востребованными из разработанных устройств для современных систем автоматизации ускорительных установок оказались многофункциональные аналого-цифровые контроллеры. Их внедрение превращало источники постоянного и импульсного тока в функционально полное оборудование.

При разработке семейства аналого-цифровых преобразователей было принято не разделять его на прецизионные и обычные приложения. Современные микросхемы сигма-дельта-преобразователя обеспечивают разрешение измерителя до уровня 10^{-6} , а использование калибровки аналогового тракта измерителя гарантирует и высокую точность. Аппаратные и программные затраты на осуществление калибровки невелики.

Построение цифроаналоговых преобразователей свести к одной унифицированной структуре не удалось. В большинстве приложений разрешение ЦАП выше 16 бит не нужно и требования к стабильности выходного напряжения не превышают 10^{-4} , поэтому при создании многоканальных устройств используется классическая схема с единственным преобразователем и несколькими запоминающими устройствами. Это решение представляется наиболее экономичным [3].

Однако во многих электрофизических установках имеются устройства с повышенными требованиями к стабильности (до 10^{-5}) и разрешающей способности (18–20 бит). Это,

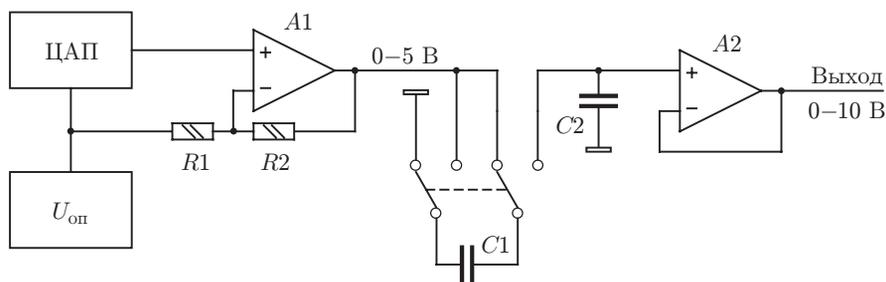


Рис. 1. Организация прецизионного цифроаналогового преобразователя ($U_{\text{оп}}$ — опорное напряжение)

как правило, источники питания, определяющие принципиальные возможности установок. Для построения прецизионных цифроаналоговых преобразователей в наших разработках была использована микросхема сигма-дельта-ЦАП DAC1220. Упрощённая схема цифроаналогового тракта приведена на рис. 1. На схеме обращают на себя внимание две нетипичные конструкции — промежуточный усилитель (A1) и коммутируемые ёмкости. Что касается первого схемного решения, то оно вызвано тем обстоятельством, что микросхема ЦАП имеет выходной каскад типа rail-to-rail. Теоретически такой выход может выдавать напряжение от «земли» до напряжения питания. Практически же линейность гарантируется для выходного напряжения, отстоящего от потенциалов питания и земли не менее чем на 20 мВ. Компенсация «краевых эффектов шкалы» осуществляется комбинированным способом. Микроконтроллер умножает код, заносимый в микросхему ЦАП, на величину $1 - 1/127$ (цифровое «сжатие» выходного диапазона). Затем усилитель A1 «растягивает» шкалу аналоговым образом, компенсируя цифровое сжатие. Поскольку коэффициент усиления составляет всего $1 + 1/127$, то даже при использовании недорогих резисторов типа С2-29 их вклад в дрейф выходного напряжения пренебрежимо мал.

Вторая нетипичная конструкция вызвана следующим обстоятельством. Размах выходного напряжения микросхемы ЦАП составляет 0–5 В, а стандартизованная шкала для аналоговых сигналов разрабатываемых устройств принята ± 10 В. Таким образом, выходной сигнал микросхемы ЦАП нужно усилить в 4 раза и сделать биполярным. Наиболее экономичным способом с гарантированной точностью преобразовать сигнал микросхемы цифроаналогового преобразователя в нужный выходной размах представляется система так называемых «летающих ёмкостей». Ёмкость C1 заряжается от выхода ЦАП, а затем подключается последовательно с этим напряжением к ёмкости C2. После нескольких циклов переноса заряда напряжение на ёмкости C2 равно удвоенному напряжению с выхода усилителя A1. Аналогичным образом выполняется инверсия выходного сигнала (на схеме не показано). Достоинства такого метода заключаются не только в дешевизне реализации, но и в отсутствии элементов подстройки при погрешности преобразования сигнала порядка 0,0001 %

Приведённые примеры иллюстрируют тот факт, что при разработке схемотехники устройств особое внимание уделялось минимизации настроечных операций, технологичности производства и поддержанию высоких метрологических характеристик при минимальном количестве прецизионных элементов в схемах. В частности, аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователи не имеют подстройки «нуля» (это гарантируется механизмом калибровки), подстройки требует только масштаб преобразователей. Во многих случаях схемотехнические методы сочетались с цифровыми. Так, например, точность цифроаналогового преобразователя повышается программным образом: микропроцессор измеряет выходное напряжение и вносит поправки в цифровой код для микросхемы ЦАП.

Параметр	Значение
Шкала АЦП и ЦАП	10 В
Абсолютная погрешность АЦП	0,002 %
Температурная стабильность АЦП	1 ppm/°C
Абсолютная погрешность прецизионного ЦАП	0,002 %
Температурная стабильность прецизионного ЦАП	1 ppm/°C
Разрядность прецизионного ЦАП	21 бит
Абсолютная погрешность многоканального ЦАП	0,03 %
Температурная стабильность многоканального ЦАП	10 ppm/°C

Основные параметры разработанных цифроаналоговых и аналого-цифровых структур приведены в таблице.

Функциональные возможности. Если раньше модули для автоматизации практически полностью характеризовались небольшой таблицей параметров (разрешение, точность и быстродействие преобразователей) и стандартом исполнения, то сегодня очень важными являются функциональные возможности устройств, алгоритмы взаимодействия с системой управления, протоколы обмена. Соответственно при разработке комплекта модулей этим моментам было уделено особое внимание.

Протоколы высокого уровня определяют правила доступа к сети и методы обмена информацией с управляющими ЭВМ. Они никак не специфицируют свойства и функции конкретных устройств. Нередко разработчики, стараясь сохранить максимум возможностей своего устройства (и сэкономить время на разработку), предоставляют для управления непосредственно регистры микросхем, предполагая, что все сложности будут спрятаны во внешних драйверах и библиотеках. Однако современные микросхемы АЦП, ЦАП и другие подобные в обращении чрезвычайно сложны. Не самая сложная микросхема ADS1210, применяемая в большинстве описываемых контроллеров в качестве аналого-цифрового преобразователя, состоит из 16 регистров, из них четыре содержат битовые флаги, которые влияют на работу устройства.

Для фиксированного набора интерфейсов и программных сред создать набор драйверов и библиотек возможно, хотя в системах управления электрофизическими установками используются различные операционные системы, среды программирования, сетевые интерфейсы и образуется слишком много комбинаций с несовместимыми библиотеками. Кроме того, как показывает опыт, самые подробные описания устройства не могут воспрепятствовать неправильной работе с микросхемами ни физика, пишущему программы, ни, тем более, профессиональному программисту. И хорошо ещё, если ошибка приводит к неправильной работе, это быстро обнаруживается. Но, например, микросхеме АЦП можно указать использовать внутренний источник опорного напряжения вместо внешнего. При этом измеритель будет работать вполне корректно, только термостабильность значительно понизится. Такие ошибки крайне трудно выявить. Наиболее корректно обращаться с регистрами микросхемы может только разработчик устройства.

Основные функции устройств систем автоматизации электрофизических установок достаточно хорошо определены, поэтому было принято решение организовать пользователю не физические ресурсы, а виртуальные. Микроконтроллер предоставляет управляющей сети набор стандартных функций для каждого ресурса независимо от типа используемых микросхем и конкретной схмотехники. Реализуемые функции можно разделить на два блока: функции общего назначения для типичных приложений и специализированные функции, ориентированные на потребности электрофизических установок. Рассмотрим в качестве примера некоторые функции цифроаналоговых преобразователей.

Функцией общего назначения цифроаналогового преобразователя является выдача напряжения по команде управляющей ЭВМ. Большая часть оборудования электрофизических установок не налагает особых требований на скорость изменения управляющего напряжения [2]. Однако существуют процессы, требовательные к скорости изменения этих напряжений или к их синхронности, в частности процесс ускорения заряженных частиц в циклических ускорителях. В процессе ускорения все магнитные элементы ускорительного кольца (от 100 до 1000) должны перестраиваться синхронно. Для использования в таких приложениях все цифроаналоговые преобразователи разработанных устройств содержат механизм генерации выходных напряжений, формируемых методом линейной интерполяции из массива промежуточных точек. Это позволяет избавиться от пересылки большого объёма информации по сети.

Аналого-цифровой преобразователь также является многофункциональным устройством. Самый востребованный — режим многоканальных измерений. В этом режиме микропроцессор поочерёдно подключает к преобразователю один из входных каналов, запоминает измеренное значение во внутренней памяти и, если установлен соответствующий флаг, автоматически высылает измеренное значение в линию связи. Для достижения высокой точности и хорошего (80 дБ) подавления сетевых помех частота дискретизации в этом режиме не превышает 50 Гц.

Для детальной диагностики одного канала нередко требуется осциллографический режим с повышенной до 1 кГц частотой дискретизации. Использование измерителя и в качестве осциллографического канала представляется экономичным решением. Реализация этого режима во всех устройствах с АЦП позволила сделать периодический контроль пульсаций источников питания стандартной диагностической процедурой на установках, разработанных в ИЯФ СО РАН [7, 8]

Описанные режимы являются режимами общего назначения, используемыми в самых различных приложениях. Существуют и более специфичные режимы. Выше упоминалось, что современные ускорительные кольца имеют быстрый рабочий цикл. Как правило, после ускорения за 50–500 мс кольцо переходит в фазу эксперимента (ускоритель для научных исследований) либо в фазу приложения (источник синхротронного излучения или медицинский комплекс). В этой фазе («полочка») пучок заряженных частиц должен иметь высокую стабильность своих характеристик. Соответственно измерения постоянных напряжений также должны обеспечивать высокие метрологические характеристики, что и выполняют в измерителях микросхемы на основе сигма-дельта-технологии. Однако при отладке рабочего цикла очень полезными являются осциллографические измерения в процессе ускорения, которые, естественно, должны синхронизироваться с рабочим циклом. Обычно такие измерения производятся либо специальными отладочными системами, либо менее точными, но более быстрыми АЦП [6].

Для оценки качества изменяющегося сигнала длительностью десятки миллисекунд частота измерений 1 кГц вполне достаточна, причём в ряде приложений требуется точная синхронизация процесса и измерений. Поэтому в устройствах был введён режим «сопровождение файла», в котором запуск процесса формирования выходного сигнала цифроаналогового преобразователя в соответствии с данными в файле автоматически инициирует начало измерений выбранного канала. При этом измерения не передаются в линию, а запоминаются во внутренней памяти устройства.

Как упоминалось выше, пользователь работает не с физическими ресурсами, а с виртуальными. Для самых простых приложений программисту нужно знать всего лишь по одной команде для каждого используемого ресурса, причём устройства даже не нуждаются в инициализационных процедурах. Это запрос измеренного напряжения на каком-либо входном канале, установка напряжения на цифроаналоговом выходе и запись/чтение регист-

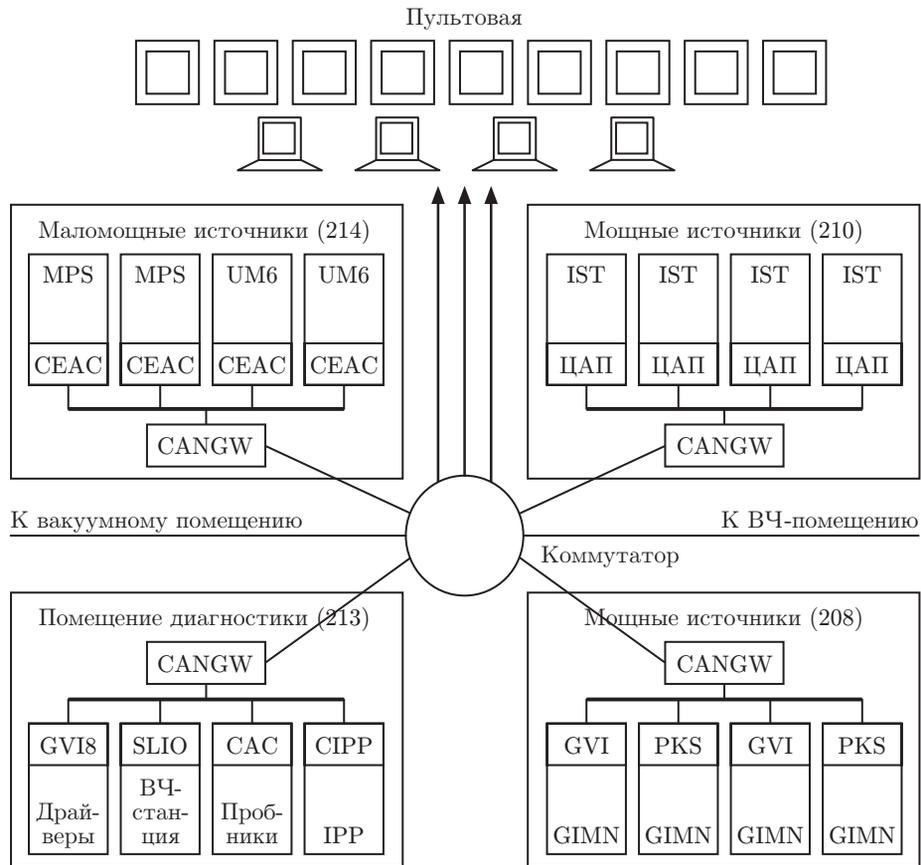


Рис. 2. Блок-схема автоматизации установки технологического накопительного комплекса

рового порта. Данные команды идентичны для всех модулей, содержащих соответствующие ресурсы, и не зависят ни от конкретной схмотехники, ни от типа применённых микросхем.

Широкое использование разработанных устройств привело к изменениям в построении структурных схем автоматизации электрофизических установок. В процессе этой эволюции Институт ядерной физики СО РАН пришёл к следующей схеме. Небольшие кластеры однородного оборудования (5–30 узлов), расположенного, как правило, в одном помещении, объединяются полевой шиной и посредством интеллектуального моста соединяются с управляющей сетью установки (Ethernet). Обычно возможности интеллектуального узла, который содержит в своём составе довольно мощный процессор, задействованы не только для ретрансляции и буферирования сообщений, но и для реализации более сложных функций. Следует отметить, что аналогичный подход всё чаще используется и в других мировых научных центрах, таких как CERN (Швейцария) [9], DESY (Германия) и др. На рис. 2 в качестве примера такого построения приведён фрагмент структуры автоматизации установки технологического накопительного комплекса [10]. Здесь показаны локальные сети мощных источников (210), питания корректоров (214) и других систем, подключённые мостами CANbus-Ethernet (CANGW) к сети установки, к которой подключаются и управляющие ЭВМ пультной комплекса.

Примеры применения разработанных устройств. Соблюдение баланса между универсальностью устройств и их специализацией позволило обеспечить максимально широкий спектр применений каждого модуля. Кроме того, использование АЦП и ЦАП с высоким разрешением незначительно увеличивает стоимость измерительного или управляющего канала, но существенно расширяет пространство возможных решений для проек-

тировщика системы управления. В частности, на электрофизических установках ИЯФ СО РАН при контроле температуры долгое время использовались полупроводниковые датчики, поскольку они более чувствительные. Появление недорогих измерительных устройств с высокой разрешающей способностью (до 10^{-6}) привело к массовому переходу на резистивные датчики [11], которые обладают более широким температурным диапазоном и радиационной стойкостью. Системы термоконтроля, созданные на базе разработанных устройств, обеспечивают разрешающую способность до 10^{-3} град, сохраняя относительно невысокую стоимость измерительного канала.

Спектр применений разработанных устройств можно проиллюстрировать на примере относительно недавно созданного устройства СЕАС124. Оно предоставляет пользователю следующие ресурсы:

- 12 дифференциальных входов АЦП с разрешением до 10^{-6} ;
- 4 выхода 16-разрядного цифроаналогового преобразователя;
- 4 регистровых выхода с оптической изоляцией;
- 4 регистровых входа с оптической изоляцией.

Наиболее распространённым применением этих контроллеров является управление источниками тока для питания магнитных элементов электрофизических установок [3]. Обычно это 1-, 2- и 4-канальные источники тока, производимые преимущественно Институтом ядерной физики СО РАН. При этом реализуются все аналоговые и цифровые ресурсы устройства.

Интересно отметить использование СЕАС124 для управления источником питания магниторазрядных насосов ВИП-27, разработанных и произведённых ООО «КБСТ» (г. Выборг). В данном приложении технология сигма-дельта-АЦП выглядит весьма уместной. На многих электрофизических установках величина вакуума фактически определяется измерением токов магниторазрядных насосов. Точность измерения тока может быть небольшой, однако динамический диапазон сигнала довольно значителен. Применение СЕАС124 даёт возможность при выходной шкале источника 10 мА обеспечить разрешение 10–20 нА в едином диапазоне.

Кроме обслуживания относительно однородных многоканальных систем, устройство хорошо вписывается в нестандартные комплексы. В качестве примера можно привести систему управления электронно-лучевой пушкой Новосибирского ЛСЭ [12]. В данном приложении блок СЕАС124 управляет различными источниками питания (накала, катода, модулятора), измеряет их напряжения и токи в нагрузках. Используется также и дискретный ввод/вывод. Поскольку вся конструкция «подвешена» на потенциале 300 кВ, то связь с системой управления осуществляется через дополнительную оптическую развязку. Этот пример показывает, что даже небольшое универсальное устройство может управлять целой подсистемой, если набор ресурсов устройства сбалансирован.

В некоторых приложениях требуется функциональность, не реализованная в стандартном наборе блоков. В подобных случаях обычно удаётся вместо разработки нового устройства модифицировать программное обеспечение существующего. Так, в устройстве НУТ установки электронного охлаждения синхротрона COSY [13] для модуляции электронного пучка в стандартный блок был «вписан» программируемый генератор со специфическими функциями.

Результаты работы могут быть проиллюстрированы рис. 3. Аппаратура управления комплекса ВЭПП-4, выполненная в стандарте КАМАК, показана на рис. 3, *a*. Управляемое оборудование (источники питания, ВЧ-генераторы и др.) расположено в другом помещении. На рис. 3, *b* приведены современные стойки питания магнитной системы ЛСЭ — 192 канала маломощных источников тока и стойка управления 2500-амперным источником питания вигглера. Аппаратура управления и контроля располагается непосредственно

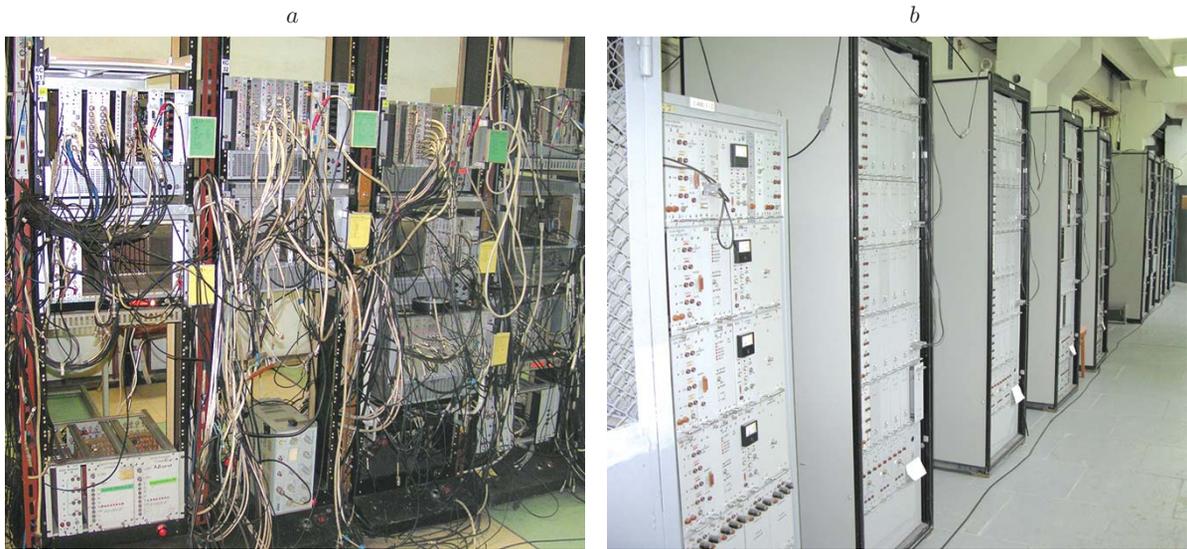


Рис. 3. Старый и новый стили автоматизации ускорительных установок: аппаратура автоматизации на ВЭПП-4 (а) и стойки источников питания ЛСЭ (б)

в стойках источников питания и объединяется с системой управления единственным кабелем. Ликвидация избытка внешних трасс, промежуточных разъёмов и клеммников не только удешевляет систему, но значительно повышает её надёжность и снижает эксплуатационные затраты.

Заключение. В данной работе представлен набор универсальных многофункциональных устройств, предназначенных для построения систем автоматизации электрофизических установок. Особенностью этих устройств является комбинирование функций общего назначения, обеспечивающих лёгкую интеграцию в типичных приложениях, и набора функций, ориентированных на специфические потребности систем управления электрофизическими установками.

Разработанные устройства являются основой систем автоматизации многих электрофизических установок, созданных в Институте ядерной физики СО РАН (ВЭПП-2000, ВЭПП-3/4, Лазер на свободных электронах) и в других научных центрах, таких как НИЦ «Курчатовский Институт» (Москва), Объединённый институт ядерной физики (г. Дубна, Россия), KAERI (Корея), IMP (Китай), FZJ (Германия). Кроме того, их использование запланировано в ряде других перспективных проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shatunov Yu. M., Evstigneev A. V., Ganyushin D. I. et al. Project of a new electron-positron collider VEPP-2000 // Proc. of EPAC-2000. Austria. P. 439–441.
2. Vinokurov N. A., Bolotin V. P., Kayran D. A. et al. Status of Novosibirsk Terahertz FEL // Proc. of FEL-2004. Italy. P. 226–228.
3. Козак В. Р., Купер Э. А., Винокуров Н. А. и др. Система управления Новосибирским лазером на свободных электронах // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2012. 7, № 3. С. 24–33.
4. Montabonnet V., Ciccione L. Four quadrant 60A, 8V power converters for LHC // Proc. of EPAC-2008. Genoa, Italy. P. 3655–3657.
5. Heidbrook N. Correction magnet power supplies // Proc. of EPAC-2002. Paris, France. P. 2475–2477.

6. **Louie W., Dalesio L., Ganetis G., Tian Y.** NSLS-II power supply controller // Proc. of PAC-2011. N. Y., USA. P. 1187–1189.
7. **Berkaev D. E., Belikov O. V., Kozak V. R. et al.** System of power supply ripples measurement for VEPP-2000 collider // Proc. of ICALEPCS-2009. Kobe, Japan. P. 152–154.
8. **Velikanov Yu. M., Veremeenko V. F., Vinokurov N. A. et al.** Control system for magnet power supplies for Novosibirsk free electron laser // Proc. of ICALEPCS-2011. Grenoble, France. P. 480–482.
9. **King Q.** Status of the LHC power converter controls // Proc. of ICALEPCS-2009. Kobe, Japan. P. 4–6.
10. **Anchugov O., Arbuzov V., Belikov O. et al.** Status of "Zelenograd" storage ring // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. 2009. **603**, N 1/2. P. 4–6.
11. **Gudkov B. A., Selivanov P. A., Kozak V. R. et al.** Temperature measurement system of Novosibirsk free electron laser // Proc. of ICALEPCS-2011. Grenoble, France. P. 1044–1046.
12. **Kuper E. A., Kozak V. R., Mamkin V. R. et al.** The system of power supplies, control and modulation of electron gun for free electron laser // Proc. of the XXIII Russian Particle Accelerator Conference. Saint Petersburg, Russia, 24–28 September, 2012. P. 427–429.
13. **Chekavinskiy V. A., Bekhtenev E. A., Gusev I. A. et al.** High voltage terminal in COSY electron cooler // Proc. of the XXIII Russian Particle Accelerator Conference. Saint Petersburg, Russia, 24–28 September, 2012. P. 503–505.

Поступила в редакцию 17 сентября 2013 г.
