

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

В.Р. Козак, Э.А. Купер

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ КОНТРОЛЛЕРЫ  
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ  
ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ

ИЯФ 2001-70

Novosibirsk  
2001

**Микропроцессорные контроллеры  
для управления источниками питания**

*В.Р. Козак, Э.А. Купер*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера  
630090 Новосибирск, Россия

**Аннотация**

В препринте описаны микропроцессорные устройства для управления многоканальными источниками питания для электрофизических установок. Устройства обеспечивают выдачу управляющих воздействий и контроль выходных параметров источников. Связь с управляющей ЭВМ реализована посредством шины CANbus. В работе рассмотрены особенности аппаратного построения, а также встроенного программного обеспечения.

**Microprocessor based devices for power supplies**

*V.R. Kozak, E.A. Kuper*

**Abstract**

Microprocessor based devices for multichannel power supplies is described. These devices provide analog and digital input/output. Devices are connected with a control computer by CANbus. Here are considered hardware and embedded software features.

---

## 1. Введение

В ИЯФ проводятся работы по созданию новых (ВЭПП-5, FEL) и модернизации действующих (ВЭПП-2000) электрофизических установок. Каждая установка включает в себя сотни магнитных элементов (линзы, корректора), которые запитываются источниками питания, разрабатываемыми и производимыми в институте. Все источники питания управляются от ЭВМ посредством цифроаналоговых преобразователей (ЦАП), а контроль тока в нагрузке и напряжения на ней осуществляется с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Поскольку системы автоматизации в ИЯФ построены на основе стандарта КАМАК, то и соответствующие блоки (ЦАП и АЦП) были выполнены в этом стандарте.

Классическая схема управления и контроля источниками питания магнитной системы электрофизической установки имеет ряд недостатков. Во-первых, использование промежуточного конструктива (КАМАК) приводит к возникновению большого количества сигнальных трасс и дополнительных разъёмных соединений, что в свою очередь понижает надёжность системы и вынуждает периодически бороться с помехами в сигнальных трактах. Во-вторых, специфика рабочего цикла установки (синхронное изменение конфигурации магнитной системы) требует довольно высокой производительности как управляющих ЭВМ, так и трактов данных.

В современных системах автоматизации описанные проблемы преодолеваются использованием микропроцессорных контроллеров, встраиваемых непосредственно в источники питания. Эти контроллеры снабжены необходимым набором цифровых и аналоговых устройств ввода-вывода. Они способны осуществлять многие функции автономно, например, изменение тока питания магнитных элементов ускорителя по заданному закону, циклические измерения токов и напряжений в различных точках источников питания и т.д. Это минимизирует количество обращений управляющей ЭВМ и повышает надёжность системы в целом.

В ИЯФ первые системы подобного вида были использованы для управления магнитной системой накопителя ВЭПП-4 [1]. Успешный многолетний опыт эксплуатации контроллеров и доступность современной элементной базы стимулировали разработку нового поколения контроллеров для источников питания.

## 2. Технические требования к контроллерам

С точки зрения требований к контроллерам, элементы магнитной системы и, соответственно, требования к источникам питания можно разбить на две группы. Первая включает в себя поворотные магниты и фокусирующие линзы, а вторая – слаботорочные коррекции. Элементы первой группы непосредственно управляют положением пучка и требуют высокой стабильности и точности источника питания. Типичные требования для этой группы магнитных элементов лежат в диапазоне от 0.01% до 0.001%. К источникам питания корректоров требования значительно ниже. Как правило, стабильность и точность таких устройств лежат в диапазоне 1 – 0.1%.

Значительное различие метрологических требований к преобразователям предполагает разработку и использование как минимум двух различных приборов – прецизионного цифроаналогового преобразователя для источников питания поворотных магнитов и линз и недорогого ЦАПа среднего класса для источников питания корректоров. Эта работа посвящена разработке и созданию интеллектуальных контроллеров для источников питания корректоров.

Источники питания корректоров являются относительно маломощными и традиционно выполняются многоканальными. Они располагаются в одной стойке стандарта «Вишня» и обычно имеют 16 каналов. Проектирование многоканального контроллера представляется и естественным и экономичным. Кроме 16-канального цифроаналогового преобразователя контроллер должен обеспечить контроль тока, выдаваемого в нагрузку. На современном физическом комплексе используются сотни источников питания, поэтому контроль их функционирования является безусловным требованием. Для повышения надежности всей системы разумно контролировать не только ток в нагрузке, но и напряжения на ней. Таким образом, минимальное количество измерительных каналов составляет 32. Для технологического контроля целесообразно предусмотреть дополнительные каналы, доведя их общее количество до 40. Многие источники питания кроме аналоговых сигналов требуют еще и логического ввода/вывода. С этой целью блок желательно дополнить регистрами ввода и вывода логических сигналов.

Невысокие требования к метрологическим характеристикам контроллера источников питания корректоров позволяют выполнить аналоговую часть устройства без использования гальванической развязки, что значительно удешевляет устройство. Однако, линии передачи аналоговых сигналов безусловно должны выполняться по двухпроводной технологии. В этом случае общее количество аналоговых соединений между контроллером и источниками питания составляет  $2 \cdot 40 + 2 \cdot 16 = 112$  линий. Минимальное количество соединений регистров ввода/вывода составляет  $2 \cdot (8+8) = 32$ . Итого,

полное количество соединительных линий и, соответственно, контактов разъемов достигает 144. Современная элементная база не препятствует выводу такого количества сигналов из одного блока стандарта «Вишня», однако это приводит к массе неудобств в процессе эксплуатации системы. Поэтому представляется целесообразным реализовать контроллер системы в виде двух блоков. Кроме того, выбор такого варианта значительно упрощал встроенное программное обеспечение.

Для соединения множества контроллеров источников питания с управляющими ЭВМ требуется выбрать какую-то стандартную среду передачи данных. При изобилии стандартов для передачи данных между ЭВМ и периферией, достаточно распространенных и удовлетворяющих требованиям эксплуатации на больших физических комплексах существует не так уж и много. В последнее время в мировых физических центрах все большее распространение получает CANbus [2], разработанный первоначально для автомобильной промышленности. Достоинства этого стандарта

- высокая надежность;
- гарантированное время доставки пакета с высоким приоритетом;
- широкая поддержка производителей элементной базы;
- возможность гальванической развязки между устройством и средой передачи данных;
- относительно невысокая нагрузка на процессор оконечного устройства;

компенсируют невысокую, по современным меркам, пропускную способность, тем более, что использование процессора в устройстве значительно уменьшает требования к трафику.

Исходя из вышеизложенного, было принято решение встроить в контроллеры источников питания интерфейс CANbus.

В мире существует несколько достаточно распространенных стандартов высокого уровня, базирующихся на шине CAN. Структура и ресурсы использованной микроЭВМ контроллера не препятствуют реализации какого-либо высокоуровневого стандарта. Однако, практически на всех физических установках института, где предполагается использование разработанных контроллеров (ВЭПП-3, ВЭПП-4, ВЭПП-5, ВЭПП-2000), в качестве ЭВМ нижнего уровня используется микроЭВМ Одренок, для которой реализация какого-либо высокоуровневого стандарта будет существенной нагрузкой. В силу этого в текущей реализации встроенного программного обеспечения контроллера поддержка каких-либо высокоуровневых стандартов не выполнена.

### 3. Структура контроллеров для источников питания

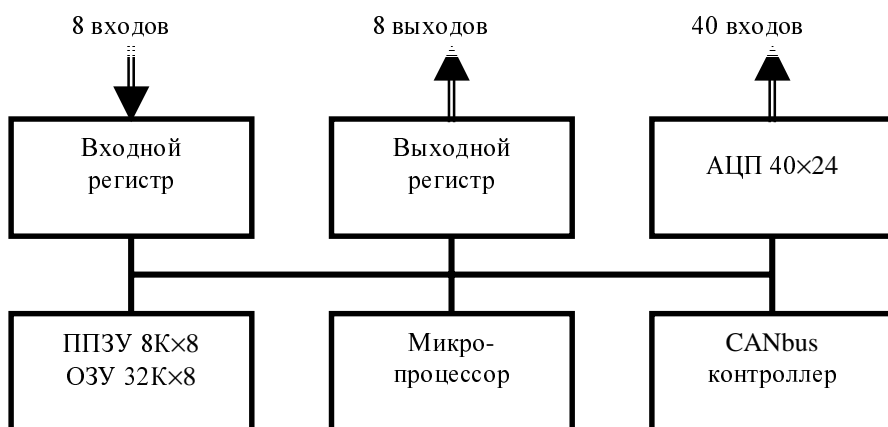
Результатом вышеописанного анализа явилось решение реализовать контроллер источников многоканальных источников питания корректоров ускорительных комплексов в виде двух отдельных блоков.

АЦП должен обеспечивать 40 двухпроводных каналов измерения с точностью не хуже 0.1%, 8 каналов выходного регистра и 8 каналов входного регистра с оптической развязкой, интерфейс к шине CANbus с гальванической изоляцией от среды передачи данных.

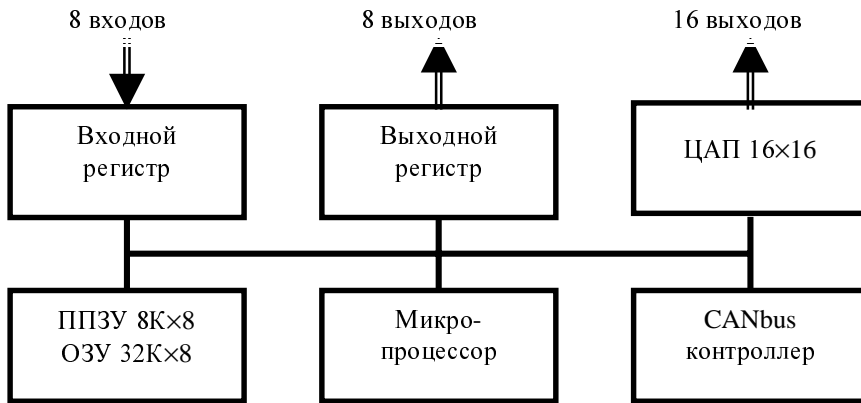
ЦАП должен обеспечивать 16 двухпроводных каналов напряжения с точностью не хуже 0.1%, 8 каналов выходного регистра и 8 каналов входного регистра с оптической развязкой, интерфейс к шине CANbus с гальванической изоляцией от среды передачи данных.

Структурное решение обоих блоков выглядит очень схожим образом, различие блоков заключается только в аналоговой части и в типе применяемых разъемов.

Блок-схема модуля CANADC 40x24



Блок-схема модуля CANDAC 16×16



Цифровая часть обоих модулей выглядит практически идентично и включает в себя:

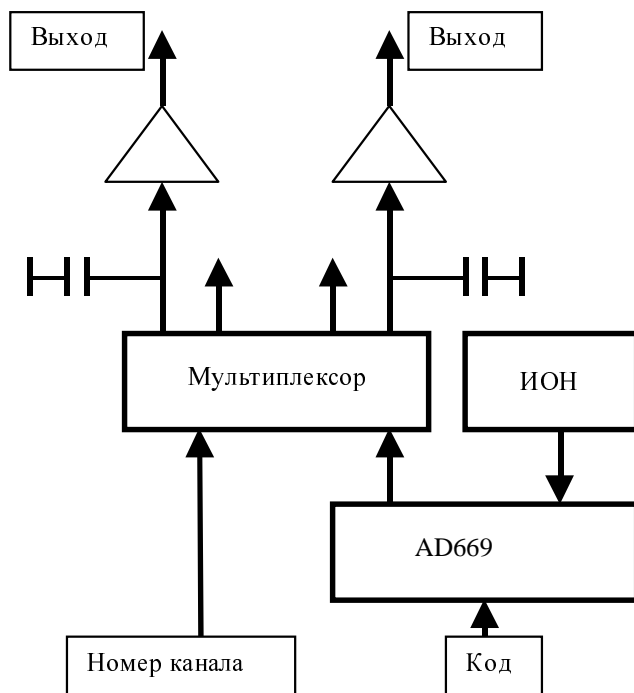
- микроЭВМ на основе микропроцессора DS80C320 с ОЗУ емкостью 32 Кбайт;
- CANbus контроллер с гальванической изоляцией от линии связи;
- микросхему программируемой логики, интегрирующей все цифровые устройства, стыковку с аналоговой частью и реализующей функции входного и выходного регистра.

#### 4. Интерфейс к шине CANbus

Для реализации интерфейса к шине CANbus была выбрана распространенная микросхема контроллера AN82527. Этот контроллер был выбран в силу его универсальности. Он обеспечивает легкую стыковку с различными типами микропроцессоров, позволяет работать как с короткими, так и длинными идентификаторами, а также облегчает работу с многими типами сообщений благодаря наличию нескольких программных каналов. Для стыковки с шиной, реализованной на витой паре, применена микросхема трансивера PCA82C251T, обеспечивающая работу с максимальной скоростью, оговоренной стандартом (1 Мбод). Трансивер запитывается от DC-DC конвертера, с контроллером соединяется посредством скоростных оптонов. Этим обеспечивается гальваническая изоляция устройства от коммуникационной линии.

## 5. Цифроаналоговый преобразователь

При проектировании цифроаналогового преобразователя была выбрана схема с использованием одной микросхемы ЦАП, которая поочередно генерирует напряжение для соответствующего канала, которое затем запоминается на емкости, где и хранится до последующего обновления. Заряд на емкостях обновляется через 10 мсек. Напряжение с емкостей снимается с помощью операционных усилителей с малым входным током. Использование в качестве основного ЦАПа 16-разрядной микросхемы позволяет иметь запас по монотонности характеристики, а при использовании дополнительного источника опорного напряжения (ИОН) получить более высокое значение точности и стабильности выходного напряжения. Блок-схема многоканального цифроаналогового преобразователя приведена ниже.



Основным время-задающим элементом рабочего цикла является таймер процессора СТ2. Этот таймер может работать в режиме 16-разрядного таймера с перезагрузкой, т.е. после первоначального старта обслуживание



процессором не требуется. Соответственно, стабильность процессов определяется только стабильностью кварцевого генератора, которая гарантируется производителем не хуже 0.01%. Таймер генерирует прерывания процессору каждые 10/16 мс. Процедура прерывания осуществляет следующие действия:

- запрещает выходы мультиплексора, отключая их от запоминающих емкостей;
- заносит в микросхему ЦАП код, соответствующий напряжению следующего канала;
- выставляет на мультиплексор адрес следующего канала;
- после установления напряжения на выходе микросхемы ЦАПа разрешает выходы мультиплексора, соединяя запоминающую емкость выбранного канала с выходом ЦАПа;
- если номер обрабатываемого канала равен 15 (последний), производится проверка флага исполнения файла. Если устройство в это время исполняет файл, то далее производится его обработка (инкремент кодов напряжений, загрузка следующей ступени файла либо завершение процесса).

Микросхема ЦАПа включена по стандартной схеме. С помощью переключек можно выбрать включение в двухполярном режиме (основное) либо в однополярном режиме (что позволяет выиграть в метрологических параметрах).

Основной вклад в температурную стабильность ЦАПа вносит его внутренний опорный источник (25 ppm/K°). Эта величина обеспечивает требуемые метрологические параметры для основной сферы применения. Однако, ряд применений требует более высоких метрологических показателей. Поэтому, в процессе коррекции платы, в схему был введен внешний опорный источник (AD688A), что позволяет добиться стабильности выходного напряжения в рабочем диапазоне температур не хуже 0.03%.

## **6. Аналого-цифровой преобразователь**

Аналого-цифровой преобразователь построен на основе микросхемы дельта-сигма преобразователя (ADS1210) и аналоговых мультиплексоров. Блок-схема аналого-цифрового преобразователя приведена ниже.

В качестве входных двухпроводных мультиплексоров используются микросхемы MPC507, которые имеют встроенную защиту входных цепей. Встроенная защита мультиплексоров допускает попадание на входы напряжения до 70 В. Применение этих микросхем позволяет существенно упростить построение входной части измерителя.

Чтобы устранить влияние входного тока преобразователя, который имеет значительную величину при высоких рабочих частотах, мультиплексоры подключаются к преобразователю через программируемый усилитель, который позволяет усиливать входные сигналы в 10, 100 и 1000 раз. Управление коэффициентом усиления и номером канала осуществляется от микроЭВМ посредством микросхемы программируемой логики.

Аналоговые мультиплексоры и программируемый усилитель (PGA) определяют часть параметров измерителя. Сумма синфазной и дифференциальной составляющей сигнала не должна превышать 11 В. Подавление синфазного сигнала осуществляется полностью микросхемой программируемого усилителя и в худшем случае превышает 80 дБ (типовая величина не менее 100 дБ).

Источник опорного напряжения (ИОН) применен внешний, так как параметры ИОНа микросхемы АЦП являются неудовлетворительными для данного применения (типовая величина дрейфа 25 ppm/K°).

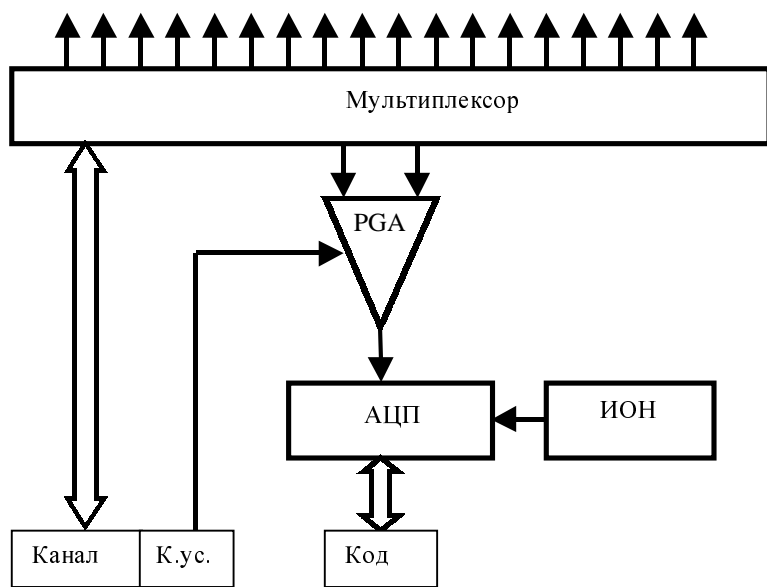
Сигма-дельта преобразователи обеспечивают высокую разрешающую способность и низкий уровень шумов, но обладают низкой стабильностью. Для компенсации этого недостатка используется процедура калибровки, которая должна производиться, как указано в данных на микросхему, «при существенном изменении напряжения питания или температуры окружающей среды». Возлагать на пользователя принятие решения о необходимости калибровки чревато недостоверными измерениями, поэтому в основном режиме прибора (многоканальные измерения) калибровка производится автоматически в начале каждого цикла многоканальных измерений. В микросхеме ADS1210 возможны несколько типов калибровок. Для данного устройства применена «внутренняя калибровка», которая устраивает по метрологическим показателям и в то же время дает некоторую экономию во времени измерения и упрощает программу в микроЭВМ.

Сигма-дельта преобразователи используют сложную цифровую обработку сигнала и корректно обрабатывают только медленно изменяющиеся сигналы. При скачкообразном изменении сигнала (или изменении на неизвестную величину), что имеет место при многоканальных измерениях, первые вычисленные коды являются недостоверными. В приборе это учитывается и при многоканальных измерениях недостоверные (или предположительно недостоверные) значения аннулируются.

Полезно также учитывать, что прибор эффективно подавляет помехи с периодом повторения кратным времени измерения (и более высокочастотные). По этой причине не рекомендуется устанавливать время измерения менее 20 мсек.

## 7. Встроенное программное обеспечение

В качестве микропроцессора для встроенной ЭВМ был выбран DS80C320 производства Dallas Semiconductors. Этот микропроцессор относительно недорогой, обладает высокой производительностью и снабжен всей необходимой для данного приложения периферией. Встроенная микроЭВМ реализует несложный протокол обмена с управляющей ЭВМ и обеспечивает все необходимые режимы работы устройств на плате. В текущей версии программного обеспечения реализован обмен с CANbus сообщениями со стандартными идентификаторами и четырьмя фиксированными скоростями: 1 Мбод, 500, 250 и 125 Кбод. Поле идентификатора используется для адресации.



6 битовых позиций определяют адрес устройства на линии. Этот адрес задается на плате устройства переключателями. Остальные биты определяют тип обмена (адресный- широковещательный, к блоку/от блока) или не используются. Понятие «адрес HOSTа» отсутствует, что позволяет на линии существовать нескольким управляющим узлам. Дальнейшая детализация производится по первому байту данных.

Подробный список команд приводится в описании каждого устройства, здесь мы остановимся лишь на некоторых характерных особенностях. Кроме специфических для каждого устройства команд, существует ряд команд,

общих для всех устройств. Эти команды либо отражают наличие общего оборудования для различных устройств (как например регистры ввода/вывода), так и вспомогательные команды, облегчающие обслуживание системы.

К примеру, каждый блок выдает пакет своих атрибутов, в которые входят:

Тип блока (CANDAC-16×16, CANADC40, CDAC20, и т.д.).

Версия аппаратного обеспечения.

Версия программного обеспечения.

Причина выдачи этого пакета.

Этот пакет выдается по следующим причинам: включение питания, нажатие кнопки «Сброс», адресный запрос и безадресный запрос. Таким образом, контроллер всегда может определить, какие устройства присутствуют на линии. Это помогает разбираться с неправильно установленными переключками, обнаруживать устройства с устаревшим программным обеспечением.

В блоке CANDAC16×16 микроЭВМ реализует простую работу (запись/чтение регистров ввода/вывода, запись напряжения в канал ЦАПа, считывание этого кода для контроля) и более сложную. В память микроЭВМ может быть записано до 8-ми файлов, описывающих изменение выходных напряжений ЦАПов во времени методом кусочно-линейной интерполяции.

Файл состоит из последовательности записей, каждая из которых описывает поведение выходов ЦАПа на временном отрезке не более 2,5 сек. Запись включает в себя количество инкрементов и собственно инкременты для каждого канала. Количество инкрементов эквивалентно отрезку времени с временным квантом 10 мсек. Инкременты представляют из себя знаковые величины, которые суммируются с текущим значением кодов, загружаемых в ЦАП. Если на данной ступени для какого-либо канала не требуется изменять выходное напряжение, величину инкремента следует указать нулевой.

Процесс обработки записи происходит следующим образом. Каждые 10 мсек (в соответствии с прерываниями основного таймера процесса) микроЭВМ суммирует коды напряжений для всех выходов ЦАПа с соответствующими инкрементами, содержащимися в данной записи. После этого счетчик инкрементов уменьшается на единицу. Если счетчик исчерпался, то микроЭВМ подготавливает для обработки следующую запись. Это продолжается до исчерпания файла.

Файлы снабжены метками, что позволяет организовать групповой старт и синхронное изменение во времени напряжений для всех или группы ЦАПов на линии. Неопределенность во времени для отдельного канала составляет 10 мсек, но точность и стабильность основных часов процесса не хуже 0.01%.

В блоке CANADC40 микроЭВМ реализует два основных режима измерений- многоканальный и одноканальный. Для многоканального режима задаются номера первого и последнего канала сканирования, отмечается нужно ли выдавать измеренную информацию в линию или просто записывать ее во внутренний буфер и выдавать наружу по специальному запросу, а также указание производить ли один цикл сканирования либо производить измерения вплоть до прерывания по команде (бесконечно). Этот режим снабжается также меткой, что позволяет организовать одновременный старт группы приборов для синхронизации измерений.

В одноканальном режиме также помечается выдавать ли измерения в линию или складывать во внутренний буфер. Следует отметить, что в одноканальном режиме информация запоминается в кольцевом буфере емкостью 4096 измерений, а время каждого измерения может быть от 1 мсек до 160 мсек. Таким образом, прибор может выполнять функции цифрового осциллографа. Это дает возможность подробно исследовать поведение выходных параметров источника во времени (величина пульсаций, характер перехода от одного уровня к другому, наличие возбуждения и т.д.). Кроме того, наличие файла, хранящего поведение источника, чрезвычайно полезно при поиске «случайных», необъяснимых сбросов пучка.

## 8. Основные параметры

Параметры блока CANDAC-16×16	
Разрядность ЦАПа	16 бит
Разрешающая способность	16 бит
Точность в диапазоне температур (для модели CANDAC-16×16 M)	0.1% (0.03%)
Выходное напряжение (возможна униполярная шкала)	±10В (10В)
Сопротивление нагрузки	10 КОм
Временной квант при исполнении файла	10 мс
Количество файлов в памяти	8
Количество записей в файле	60
Точность внутренних часов	0.1%
Стабильность внутренних часов	0.01%
Каналов выходного регистра	8
Коммутируемое напряжение	50 В
Коммутируемый ток	100 мА
Каналов входного регистра	8
Входное напряжение срабатывания	2.5 – 6.0 В

Входное сопротивление регистра ввода	510 Ом
Допустимое напряжение для гальванической изоляции регистров	1500 В
Скорости обмена	1000, 500, 250, 125 Кбод
Напряжение питания блока	5В
Потребляемый ток	Менее 1 А

Параметры блока CANADC-40×24	
Разрядность АЦП	24 бит
Разрешающая способность	24 бит
Эффективное количество разрядов не менее	16 бит
Точность в диапазоне температур	0.03%
Основные диапазоны входных напряжений	$\pm 10В$ и $\pm 1В$
Дополнительные диапазоны входных напряжений	$\pm 0.1В$ и $\pm 0.01В$
Входное сопротивление АЦП	10 МОм
Сумма синфазной и дифференциальной составляющей сигнала	$\pm 1 В$
Подавление синфазного сигнала	80 дБ
Время измерения	От 1 до 160 мс
Каналов выходного регистра	8
Коммутируемое напряжение	50 В
Коммутируемый ток	100 мА
Каналов входного регистра	8
Входное напряжение срабатывания	2.5 – 6.0 В
Входное сопротивление регистра ввода	510 Ом
Допустимое напряжение для гальванической изоляции регистров	1500 В
Скорости обмена	1000, 500, 250, 125 Кбод
Напряжение питания блока	5В
Потребляемый ток	Менее 1 А

## 9. Заключение

Разработанные устройства удовлетворяют сформулированным требованиям для контроллеров многоканальных источников питания корректоров. Была произведена первая партия разработанных блоков. Первые блоки работают на установке ВЭПП-5, где от них управляются источники питания ЛИНАКа ВЧ-300. Часть устройств поставлена на установку FEL, сейчас для них пишется управляющее программное обеспечение. По проекту системы питания установки ВЭПП-2000 все управление источниками питания корректоров будет производиться с помощью описанных устройств.

Накопленный опыт позволил разработать следующую модель интеллектуального контроллера источников питания (CDAC20) с более высокими метрологическими характеристиками. После завершения испытаний и производства партии этих устройств, он также будет описан.

Подробное описание и руководство для пользователя описанных устройств можно найти на институтском WEB-сайте по адресу <http://www.inp.nsk.su/~kozak/designs/designs.htm>

## Литература

1. Ю.В. Заруднев. и др. Интерполирующие цифроаналоговые преобразователи для систем питания электрофизических установок. В кн. Труды 12 всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. т.1, с.121-123, ОИЯИ, Д9-92-235, Дубна 1992.
2. CAN Specification Version 2.0, 1991, Robert Bosch GmbH, Postfach 50, D-7000 Stuttgart 1..