

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

В.Р. Козак, Э.А. Купер

ПРЕЦИЗИОННЫЙ МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ  
КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКАМИ  
ПИТАНИЯ

ИЯФ 2003-35

<http://www.inp.nsk.su//publications>

Novosibirsk  
2003

## **Прецизионный микропроцессорный контроллер для управления источниками питания**

В.Р. Козак, Э.А. Купер

Институт Ядерной Физики им. Г. И. Будкера  
630090 Новосибирск, Россия

### **Аннотация**

В препринте описано прецизионное (0,003%) микропроцессорное устройство управления источниками питания для электрофизических установок. Устройство обеспечивает 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.

### **Abstract**

Microprocessor based device for power supply control with accuracy 0,003% is described. The device provides analog and digital input/output. Device is connected with a control computer by CANbus. Here are considered hardware and embedded software features.

## **1. Введение**

В ИЯФ проводятся работы по созданию новых и модернизации действующих электрофизических установок. Каждая установка включает в себя множество магнитных элементов, которые запитываются источниками, 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 разъемных соединений, что понижает надежность системы и вынуждает периодически бороться с помехами в сигнальных трактах. Во-вторых, специфика рабочего цикла некоторых установок (синхронное изменение конфигурации поля 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 надежность 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. Структура прецизионного контроллера для**

## **ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ**

Технические требования к контроллеру источников питания подробно анализировались в [2]. Эта работа посвящена разработке и созданию интеллектуального контроллера для источников питания поворотных магнитов и фокусирующих линз. Эти магнитные элементы непосредственно влияют на положение пучка, поэтому к точности и стабильности источников питания (и, соответственно, к контроллеру) предъявляются достаточно высокие требования. Как правило, разрешающая способность и стабильность во времени должна быть не менее 0.01%, довольно часто желательно иметь этот параметр на уровне 0.002% - 0.005%.

Источники питания поворотных магнитов и фокусирующих линз должны обеспечивать выходной ток сотни и тысячи ампер. Такая энергоемкость обуславливает значительные физические размеры устройств и заметную стоимость устройства. В связи с этим представляется целесообразным каждый такой источник питания комплектовать персональным контроллером.

Такой контроллер должен включать в себя единственный канал цифро-аналогового преобразователя. Кроме выдачи прецизионного напряжения, 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 напряжение на ней. При измерении напряжения на нагрузке с повышенной точностью (20-160 мс) можно контролировать состояние нагрузки, трассы и контактов, что особенно важно при работе с большими токами. При измерениях напряжения с повышенной скоростью (1 мс) по характеру пульсаций можно судить о характере неисправностей в системе.

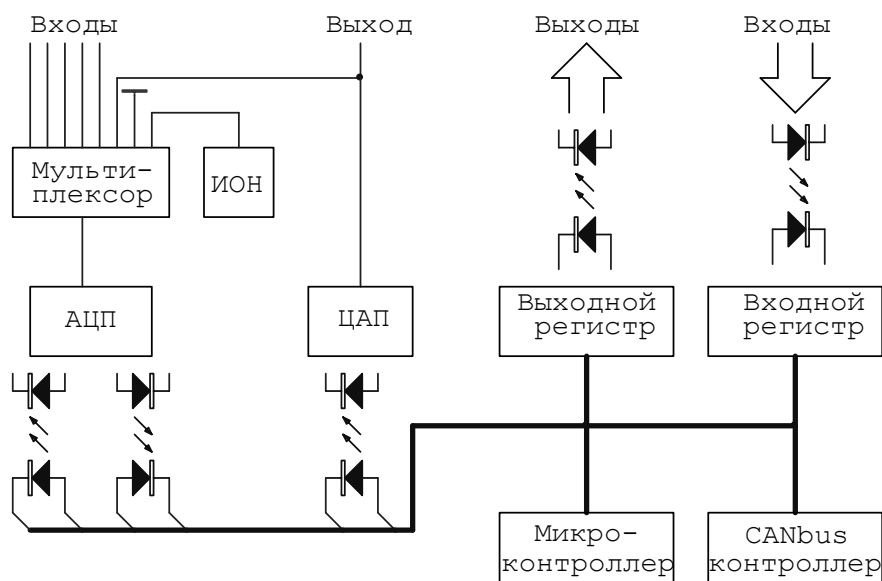
Также целесообразно иметь несколько каналов для технологического контроля состояния самого источника питания. Современные источники питания (ВЧ-300, например) кроме аналоговых сигналов требуют еще и логического ввода/вывода. С этой целью блок желательно дополнить регистрами ввода и вывода логических сигналов.

Таким образом, контроллер источника питания должен содержать следующие функциональные узлы:

- АЦП с 8-канальным двухпроводным мультиплексором ;

- одноканальный ЦАП;
- 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 разработанного устройства показано ниже.



Блок-схема модуля CDAC20

Цифровая часть модуля включает в себя

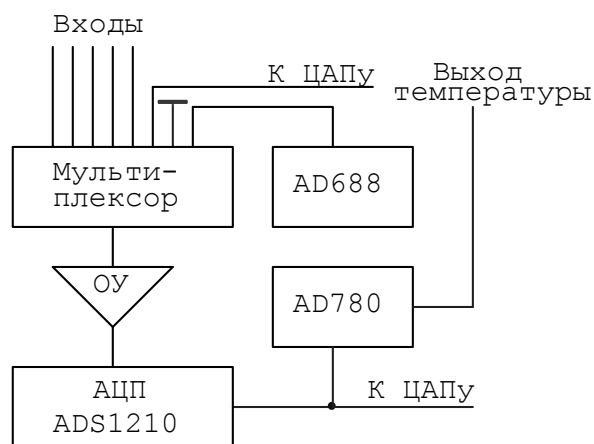
- микроЭВМ на основе микропроцессора DS80C320 с ОЗУ емкостью 32Кбайт;
- CANbus контроллер с гальванической изоляцией от линии связи;
- микросхему программируемой логики, интегрирующей все цифровые устройства, стыковку с аналоговой частью и реализующей функции входного и выходного регистра.

### 3. 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 оптронов. Этим обеспечивается гальваническая изоляция устройства от коммуникационной линии.

### 4. Аналого-цифровой преобразователь.

Аналого-цифровой преобразователь построен на основе микросхемы дельта-сигма преобразователя (ADS1210) и аналоговых мультиплексов. 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.

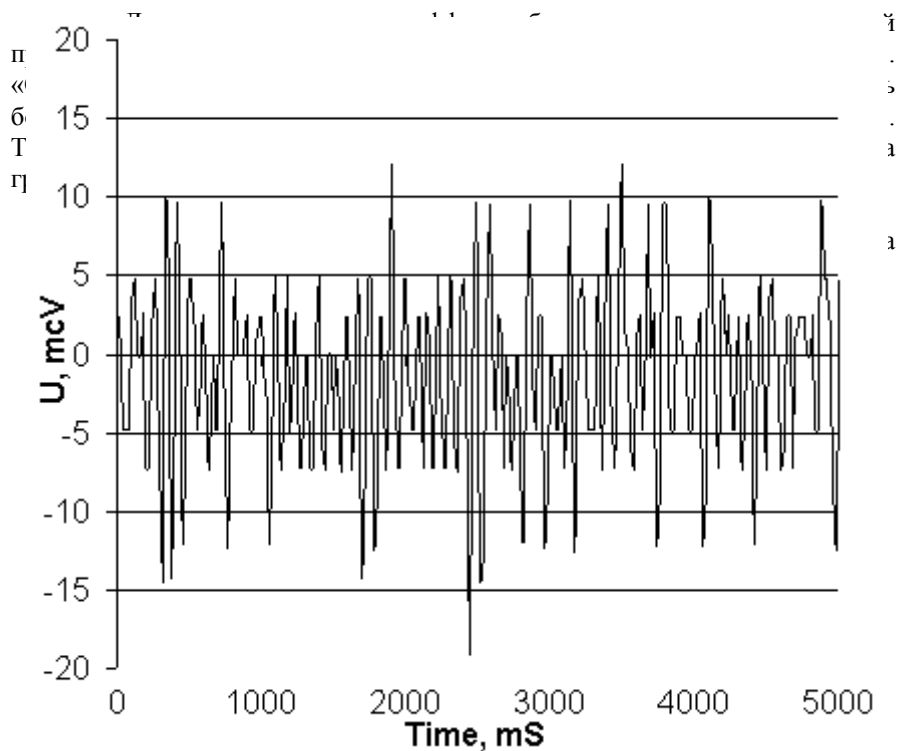
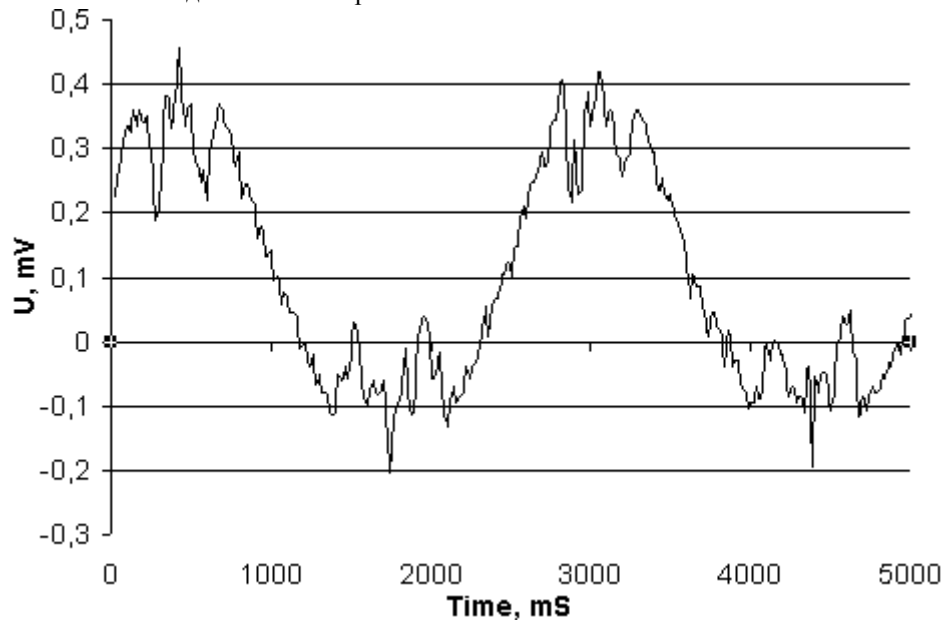
Чтобы устранить влияние входного тока преобразователя, который имеет значительную величину при высоких рабочих частотах, мультиплексоры подключаются к преобразователю через инструментальный усилитель. Сумма синфазной и дифференциальной составляющей сигнала не должна превышать 11 В. Подавление синфазного сигнала осуществляется микросхемой инструментального усилителя и в худшем случае превышает 80 дБ (типовая величина не менее 100 дБ).

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. В описываемом устройстве, в отличии от предыдущей модели (CANADC40 [2]) применена «системная калибровка», которая устраняет погрешности всего тракта аналого-цифрового преобразователя. При проведении процедуры «системной калибровки», входы измерителя подключаются к «системному нулю» и «эталонному напряжению» поочередно. Микросхема АЦП получает необходимые команды от микропроцессора, измеряет соответствующие напряжения, запоминает коды и впоследствии использует их при измерениях. Такое построение позволяет учесть ошибки смещения нуля и ошибки масштаба средствами самой микросхемы АЦП. В качестве источника эталонного напряжения использована микросхема AD688, для которой производитель гарантирует температурные изменения напряжения не хуже чем 1,5 ppm/K.

Для правильного функционирования микросхемы АЦП используется источник опорного напряжения 2.5В (AD780), питающий также и цифроаналоговый преобразователь. Эта микросхема имеет вывод температурного датчика, который может быть подключен к одному из входов АЦП общего назначения. Это дает возможность определить

температуру устройства в процессе работы и учесть температурные изменения источников опорного напряжения.

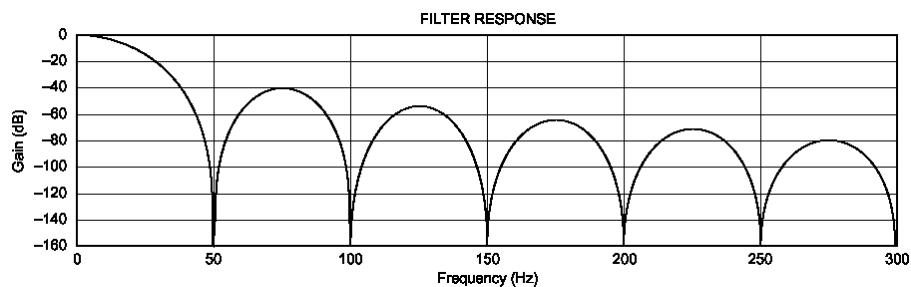
При стандартных включениях микросхемы ADS1210 (дифференциальном либо при подключении одного входа к опорному напряжению), входной сигнал может попасть в зону нулевого дифференциального напряжения (ширина этой зоны составляет несколько мВ). При этом в цифровом фильтре микросхемы образуется комбинация, которая не может быть подавлена цифровым фильтром. Этот эффект известен и описан в [3] и при измерениях выглядит как сигнал низкой частоты. Ниже приведена график измерений нулевого сигнала на приборе CANADC40 в одноканальном режиме.





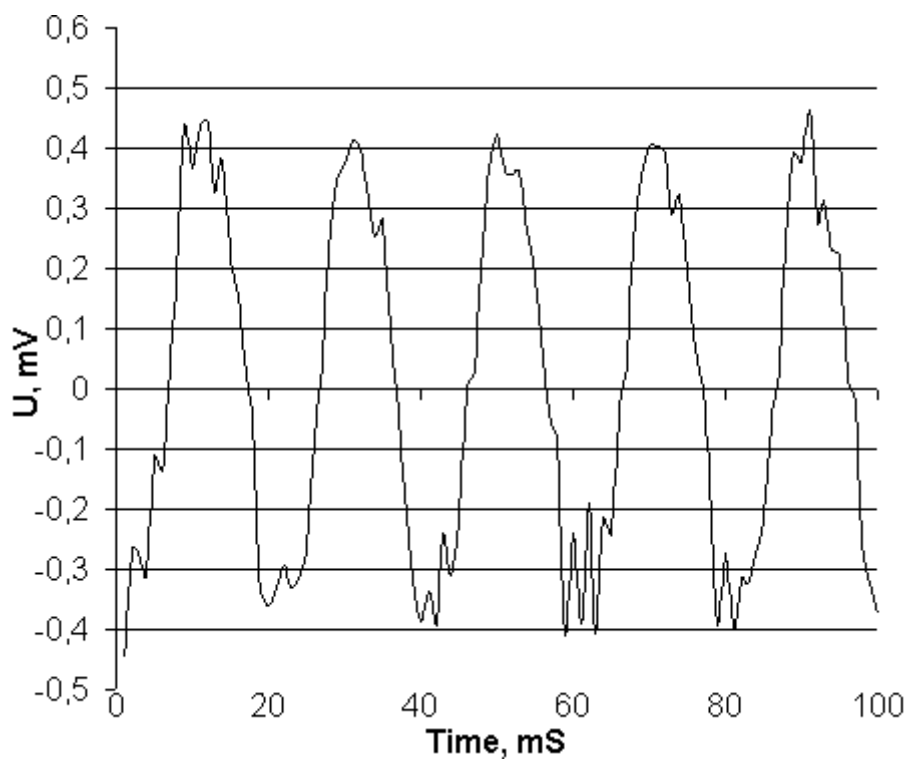
ниже.

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. В режиме многоканальных измерений темп выдачи данных в 4 раза ниже, чем в одноканальном режиме (первые три измерения могут оказаться недостоверными и отбрасываются микропроцессором).

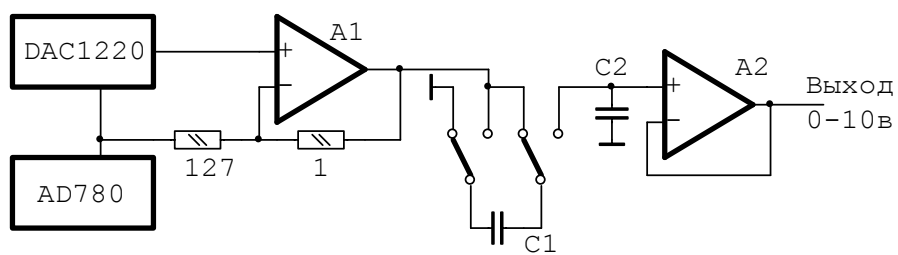


Полезно также учитывать, что прибор эффективно подавляет помехи с частотами кратным частоте измерений. Типичная частотная характеристика (для времени измерения 20 мсек) показана на рисунке. Она взята из описания микросхемы [4]. На нескольких образцах приборов проводились измерения, которые полностью совпадали с приведенной кривой.

По этой причине не рекомендуется устанавливать время измерения менее 20 мсек. Однако, если трассы между измерителем и источником измеряемого сигнала выполнены качественно, то возможно проводить измерения и на более коротких временах. Ниже приводится пример регистрации пульсаций источника сигнала при времени измерения 1 мсек/отсчет (в одноканальном режиме). Напряжение приводится в милливольтках.



### 5. Цифроаналоговый преобразователь.

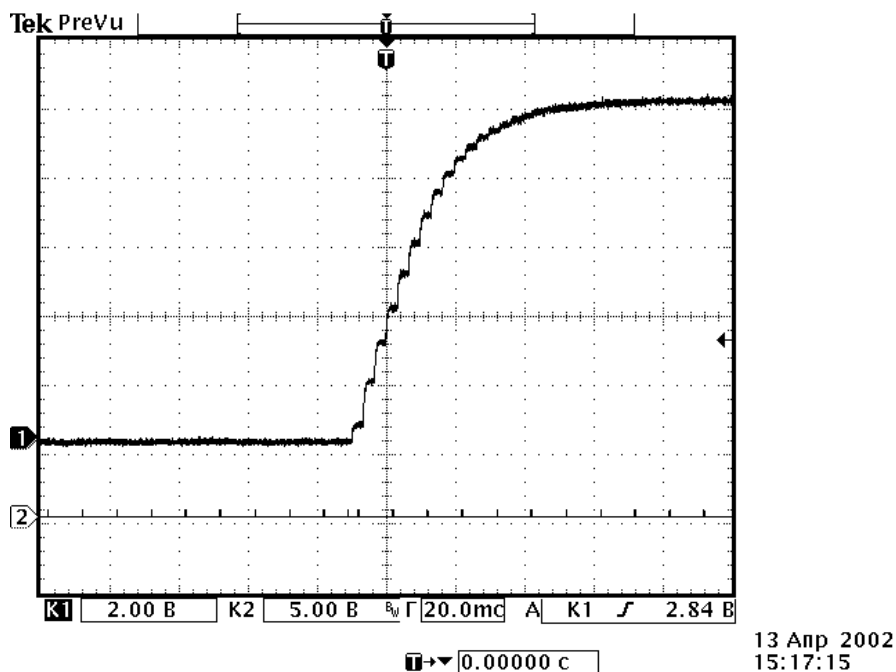


Блок-схема цифроаналогового преобразователя.

Схема цифроаналогового преобразователя базируется на микросхеме DAC1220 (Vint-Brown). Эта микросхема построена по принципу дельта-сигма преобразователя, что обеспечивает высокую разрешающую способность преобразователя при невысокой стоимости. Выходной сигнал микросхемы лежит в пределах от 0 до +5В, в то время как большинство современных источников питания в институте имеет входную шкалу 10 В (одно- или двухполярную). Кроме того, при выходном напряжении менее 10 мВ, микросхема имеет заметную нелинейность.

Компенсация нелинейности микросхемы ЦАП осуществляется усилителем А1, который усиливает в  $1^{1/128}$  раза. При таком коэффициенте усиления вклад недорогих прецизионных резисторов (С2-29) в точность и стабильность устройства является пренебрежимо малым. Для компенсации аналогового усиления микропроцессор устройства делит код ЦАПа на соответствующую величину перед засылкой этого кода в микросхему.

Удвоение выходного напряжения микросхемы ЦАП осуществляется с помощью метода «летающих конденсаторов». Формирование знака осуществляется аналогичной схемой. Использование переключаемых конденсаторов для обработки сигнала позволяет обеспечить высокую точность (погрешность менее  $10^{-5}$  в рабочем диапазоне температур) без использования прецизионных элементов. Недостатком такого построения является невозможность быстрого изменения выходного сигнала. При изменении выходного сигнала на большую величину время установления составляет 200-300 мс. Однако, для предполагаемых сфер применения эта величина не является критичной.



Использование микросхемы дельта-сигма преобразователя внесло некоторую специфику в устройство. Эти микросхемы обеспечивают высокую монотонность характеристики (20 бит), и неплохую гарантированную линейность и точность (16 бит), однако, эти параметры гарантируются только при проведении процедуры калибровки при любом изменении напряжения питания или температуры окружающей среды. В процессе калибровки микросхема игнорирует команды в течение 300-500 мс. Поскольку в процессе изменения рабочего цикла ускорительно-накопительного комплекса все магнитные элементы должны перестраиваться синхронно, процедура калибровки не может инициироваться прибором самостоятельно. Ответственность за принятие решения о проведении процедуры калибровки возлагается на управляющий компьютер, который управляет рабочим циклом установки.

Основной вклад в температурную стабильность ЦАПа вносит используемый опорный источник (3 ppm/K). Эта величина обеспечивает требуемые метрологические параметры для основной сферы применения. Однако, ряд применений требует более высоких метрологических

показателей. Поэтому, один из каналов АЦП, обладающего более высокими метрологическими параметрами, подключен к выходу ЦАПа. Это позволяет контролировать выходное напряжение ЦАПа и вносить соответствующие коррекции в коды для ЦАПа. Дальнейшее улучшение метрологических параметров может быть достигнуто измерением температуры устройства. Опорный источник ЦАПа (AD780) имеет встроенный температурный датчик, который может быть подключен к одному из входов АЦП (что уже осуществлялось в некоторых приборах). Контроль реальной температуры устройства позволяет учесть температурный дрейф источника опорного напряжения программным путем. Этот прием, по всей видимости, позволит добиться долговременной стабильности порядка  $10^{-5}$

## **6. 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, безадресный запрос, восстановление после блокировки линии связи, срабатывание watch-dog таймера. Таким образом, контроллер всегда может определить, какие устройства присутствуют на линии. Это помогает разбираться с неправильно установленными перемычками, обнаруживать устройства с устаревшим программным обеспечением.

В блоке CDAC20 микроЭВМ реализует простую работу (запись/чтение регистров ввода/вывода, запись напряжения в ЦАП, считывание этого кода для контроля) и более сложную. В память микроЭВМ может быть записано до 8-ми файлов, описывающих изменение выходных напряжений ЦАПа во времени методом кусочно-линейной интерполяции. При обслуживании АЦП, 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.

### 7. Основные параметры блока CDAC20.

Разрядность ЦАПа	21 бит
Разрешающая способность ЦАПа	21 бит
Точность в диапазоне температур ЦАПа	0.01%
Выходное напряжение ЦАПа	$\pm 10\text{В}$
Сопротивление нагрузки для ЦАПа	10 КОм
Время установления выходного напряжения	300 мс
Разрядность АЦП	23 бит
Разрешающая способность АЦП	23 бит
Эффективное количество разрядов АЦП не менее	20 бит
Точность АЦП в диапазоне температур	0.003 %
Диапазон входных напряжений АЦП	$\pm 10\text{В}$
Входной ток АЦП	$< 10\text{ нА}$
Сумма синфазной и дифференциальной составляющей сигнала	$\pm 11\text{ В}$
Подавление синфазного сигнала	80 дБ
Время измерения	От 1 мс до 160 мс
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	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

## **8. Заключение.**

Во время данной разработки значительное внимание было уделено минимизации количества подстроечных элементов. Это достигается выбором соответствующих схемотехнических решений и использованием режима регулярных системных автокалибровок .

На окончательной фазе настройки блок подвергается нагреву до 50 °С с непрерывным контролем основных параметров. Эта процедура дает уверенность в стабильной работе в реальных условиях и в какой-то мере проверяет качество сборки и качество использованных элементов.

В настоящее время произведена первая партия разработанных блоков. Блоки установлены в системе питания лазера на свободных электронах, на инжекционном комплексе, на стенде испытаний вигглеров в Институте, а также поставлены по контрактам в Германию и в Китай в составе различных физических установок.

По проекту установки ВЭПП-2000 все управление источниками питания линз и поворотных магнитов будет производиться с помощью описанных устройств.

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>

## **Ссылки**

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, сс. 121-123, ОИЯИ , Д9-92-235, Дубна 1992.
2. В.Р. Козак, Э.А. Купер. Микропроцессорные контроллеры для управления источниками питания. Препринт ИЯФ 2001-70.
3. AB-120 (Application Bulletin) Burr-Brown, 1997.
4. PDS-1284C, (ADS1210, ADS1211 description) Burr-Brown, 1996.