

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Ордена Ленина Сибирское отделение  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера СО РАН

В.Р. Козак

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЦИФРОАНАЛОГОВЫЙ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ В СТАНДАРТЕ VME

ИЯФ 2006-44

НОВОСИБИРСК  
2006

## **Прецизионный цифроаналоговый преобразователь в стандарте VME**

*V.P. Kozak*

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

### **Аннотация**

В препринте описан прецизионный цифроаналоговый преобразователь в стандарте VME. Устройство предназначено для использования в системах автоматизации физических установок, а также в составе различных стендов. При разработке устройства особое внимание было уделено минимизации количества прецизионных элементов и узлов, требующих подстройки, при высоких точностных характеристиках модуля (дрейф выходного напряжения до 1 ppm/°C). Встроенный микроконтроллер значительно облегчил реализацию заданных параметров и предоставил пользователю ряд высокоуровневых функций, которые значительно облегчают работу с устройством. Кроме цифроаналогового преобразователя, устройство предоставляет пользователю прецизионный 4-канальный аналого-цифровой преобразователь. В работе рассмотрены особенности аппаратного построения устройства, а также встроенного программного обеспечения.

### **Precise VME digital-to-analog converter**

*V.P. Kozak*

Budker Institute of Nuclear Physics  
630090 Novosibirsk, RF

### **Abstract**

Microprocessor based VME precise digital-to-analog converter for physical installation control systems is described. The device provides precise (1 ppm/°C) DAC channel and 4-channel ADC with the same precision. There was paid a special attention for reaching a maximal quality with minimization of precise and trimming components. An embedded micro-controller provides a number high-level function, which decreases expenses for designing and maintenance of large systems. Here are considered hardware and embedded software features.

## 1. Введение

В ИЯФ проводятся работы по созданию новых и модернизации действующих электрофизических установок. При автоматизации этих установок используется широкая гамма прецизионных аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей в стандартах КАМАК и CANbus [1], разработанных в нашем институте. Однако, существует ряд небольших систем автоматизации и измерительных стендов, которые по различным причинам выполнены в стандарте VME. В качестве примера можно привести системы автоматизации сверхпроводящих вигглеров [2], систему магнитных измерений [3]. В большинстве таких систем довольно остро ощущалась нехватка прецизионного цифроаналогового преобразователя. Это и инициировало разработку цифроаналогового преобразователя в стандарте VME.

Предполагаемая область использования цифроаналогового преобразователя практически однозначно определила основные характеристики разрабатываемого устройства.

1. Точность устройства должна быть не менее 0,01%.
2. Разрешение преобразователя должно быть не менее 0,001%.
3. Стабильность преобразователя должна быть не хуже 5 ppm/°C.
4. Аналоговая часть устройства должна быть гальванически изолирована от "земли" крейта VME.
5. Диапазон выходных напряжений должен быть не менее  $\pm 10$  В.

Ниже описывается построение и основные особенности разработанного устройства, удовлетворяющего вышеперечисленным требованиям.

## 2. Блок-схема устройства

Как упоминалось выше, основной областью применения разрабатываемого устройства, предполагается работа в составе небольших измерительных стендах. В таких приложениях, в отличие от систем массовой автоматизации, очень часто требуется либо очень высокая разрешающая способность преобразователя, либо высокая точность, либо и то и другое одновременно. Соответственно, при разработке устройства была предпринята попытка добиться максимального разрешения и точности устройства при сохранении бюджетной себестоимости. Имеется в виду использование недорогих компонентов и минимизация критических мест в схеме,

требующих подбора компонентов или подстройки. А это, в свою очередь, означает, что повышение характеристик разрабатываемого устройства должно реализовываться структурными решениями. Соответствующие решения могут быть впоследствии использованы в аналогичных разработках.

Первое, и самое главное, это выбор микросхемы преобразователя код-напряжение. Электронная промышленность выпускает широкую гамму цифроаналоговых преобразователей высокого разрешения. Как правило, это преобразователи на основе матрицы R-2R и аналоговых ключей. Современные преобразователи такого построения выпускаются с разрешением до 16 бит. Существует по одной модели 18-разрядного ЦАП у каждого ведущего производителя. 16-разрядные модели, гарантирующие соответствующие дифференциальную и интегральную нелинейности не дают требуемое нам разрешение. 18-разрядные микросхемы этого типа (AD760, например) стоят довольно дорого, обладают довольно большим списком недостатков, да и младший разряд является символическим. Недавняя разработка 18-разрядного преобразователя от Analog Devices (AD5680) имеет массу достоинств, но, к сожалению, очень большую интегральную нелинейность (типичное значение  $\pm 32$  кванта).

В последние годы широкое распространение получила сигма дельта архитектура построения преобразователей. Множество производителей выпускают широкую гамму таких цифроаналоговых преобразователей для аудио приложений. Существуют модели 24-разрядных преобразователей. К сожалению, эти микросхемы ориентированы на аудио приложения, имеют невысокую стабильность выходного напряжения и ряд других недостатков. Конечно, добавив качественный измеритель выходного напряжения и микроконтроллер, можно компенсировать недостатки микросхемы и удачный опыт таких разработок существует [7].

Из всего множества производимых моделей сигма дельта ЦАПов для прецизионного цифроаналогового преобразователя более всего подходит модель DAC1220 от Burr-Brown (отделение Texas Instruments). Собственно, эта модель и разрабатывалась не для аудио приложений, а для промышленной автоматизации и измерительных систем.

Микросхема DAC1220 сама по себе обладает достаточно впечатляющими параметрами. Это 20-разрядный цифроаналоговый преобразователь с гарантированной монотонностью в диапазоне рабочих температур. Производитель гарантирует линейность преобразователя не хуже, чем 0,0015%. Кроме того, для компенсации влияния температуры среды и напряжения питания в микросхеме предусмотрена процедура калибровки. Это достаточно хорошие стартовые условия для построения высококачественного прецизионного устройства.

Однако, микросхема DAC1220 обладает и рядом недостатков, о которых будет рассказано ниже, и эти недостатки ограничивают качество

конечного устройства. Часть этих недостатков может быть устранена сравнительно несложными схемными решениями, однако некоторые недостатки требуют для своего устранения радикальных решений. В рассматриваемом устройстве в качестве радикального решения было принято использование цифровой коррекции цифроаналогового преобразователя. В схему вводится высококачественный аналого-цифровой преобразователь, который позволяет измерять выходное напряжение ЦАПа и сравнивать его с тем напряжением, которое должно быть. Разность теоретического и фактического значений вносится в код, записываемый в микросхему ЦАПа, как поправка, компенсируя ошибку. Эта работа выполняется встроенным в устройство микроконтроллером, который кроме основной работы- цифровой коррекции преобразователя, выполняет и массу других полезных функций.

Таким образом, блок-схема устройства выглядит следующим образом.

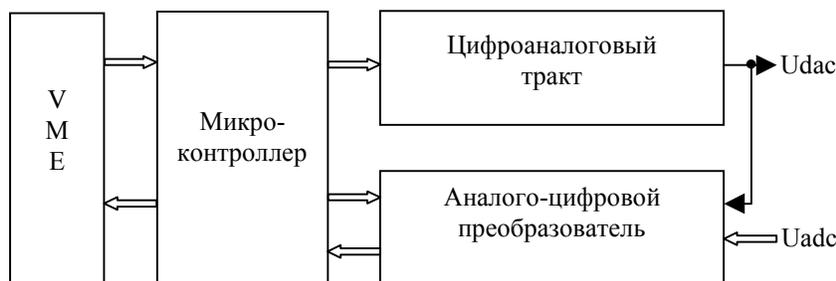


Рис. 1. Блок-схема цифроаналогового преобразователя.

1. Цифроаналоговый тракт.
2. Аналого-цифровой преобразователь, измеряющий выходное напряжение ЦАПа и предоставляющий несколько входов пользователю.
3. Микроконтроллер, осуществляющий цифровую коррекцию ошибок ЦАПа и предоставляющий ряд сервисных функций.
4. Интерфейс к шине VME.

При разработке устройства были введены следующие дополнительные условия.

- Аналого-цифровой преобразователь должен обеспечивать разрешение не хуже 2 ppm от полной шкалы и температурный дрейф не хуже 2 ppm/С. Такие параметры вполне достижимы с помощью достаточно экономичных проектных решений. Это позволит гарантированно удовлетворить исходные требования.
- Цифровая коррекция предназначена для компенсации в основном температурных уходов цифроаналогового тракта и статических ошибок. Соответственно, в процессе изменения выходного

напряжения ЦАПа новое значение величины коррекции не вычисляется. Это и понятно, при построении АЦП такого высокого разрешения, он заведомо должен быть медленным и измерение нового выходного напряжения требует заметных временных затрат.

- Как следствие предыдущего пункта, цифроаналоговый тракт изначально должен строиться достаточно качественно.

Рассмотрим построение основных узлов устройства более подробно.

### 3. Цифроаналоговый тракт

Требования к цифроаналоговому тракту органически вытекают из параметров микросхемы преобразователя- DAC1220. Микросхема для нормальной работы требует внешнего источника опорного напряжения  $2,5 \text{ В} \pm 10\%$ . При этом выходное напряжение может изменяться от 0 до  $2 \cdot U_{ref}$ , т.е. от 0 до +5 В. Очевидно, чтобы получить требуемый размах  $\pm 10 \text{ В}$  нам нужно выходное напряжение микросхемы усилить в 4 раза и сместить на полшкалы. Возможно также усилить сигнал в 2 раза, а в зависимости от требуемой выходной полярности инвертировать выходной сигнал.

В принципе нужное преобразование можно сделать с помощью единственного компонента- усилителя с программируемым коэффициентом усиления, например PGA205. Эти микросхемы позволяют без дополнительных компонентов снять сигнал с ЦАПа, усилить его в 4 раза и "привязать" средний уровень к "земле" устройства. Однако, при этом они обеспечат дрейф точности передачи сигнала до 10 ppm/С и дрейф выходного напряжения до 100 мкВ/С. Эти значения не позволят обеспечить точность устройства 0,01% в разумном диапазоне температур окружающей среды.

Попытка произвести описанные преобразования сигнала на дискретных компонентах приведет к довольно громоздкой схеме, содержащей множество прецизионных компонентов и к значительному удорожанию устройства.

Существует и еще одно обстоятельство, требующее какого-то решения. Микросхема DAC1220 имеет выходной каскад типа rail-to-rail. Теоретически выход rail-to-rail может выдавать напряжение от нижнего потенциала питания до высшего. Практически, для всех выходных каскадов такого типа производитель оговаривает фактическое возможное напряжение при определенной нагрузке (как правило высокоомной). Для микросхемы DAC1220 производитель гарантирует линейность только при выходном напряжении отстающем от потенциала питания не менее чем на 20 мВ. Для конкретных приложений такое ограничение на выходное

напряжение, как правило непринципиально, однако иметь такую особенность в цифроаналоговом преобразователе общего назначения очень неприятно.

Две описанные проблемы (нелинейность rail-to-rail выхода и преобразование выходных уровней микросхемы DAC1220 в нужную нам шкалу) было принято решать независимо друг от друга.

Компенсация "краевых эффектов шкалы" осуществляется комбинированным способом. Микроконтроллер умножает код, заносимый в микросхему ЦАП, на величину  $1-(1/127)$ , считая код биполярным. Тем самым диапазон возможных выходных напряжений уменьшается (цифровое сжатие выходного диапазона). Затем несложная схема "растягивает" шкалу аналоговым образом, компенсируя предыдущее "цифровое сжатие".

Принцип обработки сигнала показан на рис.2.

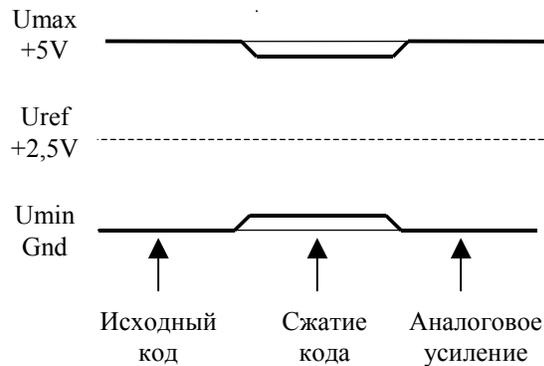


Рис.2. Компенсация нелинейности rail-to-rail выхода.

Принцип аналоговой "растяжки" проиллюстрирован на рис.3. Поскольку коэффициент усиления каскада составляет всего  $1+(1/127)$ , то даже при использовании недорогих распространенных резисторов типа С2-29 их вклад в дрейф выходного напряжения составит  $0,1 \pm 0,2\%$ .

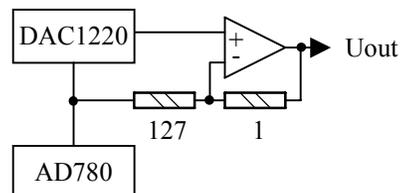


Рис.3. Схема аналогового усиления сигнала микросхемы DAC1220.

После компенсации "краевых эффектов шкалы", производится удвоение напряжения и формирование отрицательной полярности при соответствующем коде. Обе операции осуществляются с помощью метода

«летающих конденсаторов». 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.

На рис.4 показана реализация схемы удвоения напряжения. "летающая емкость" C1 заряжается от выхода операционного усилителя, затем коммутируется последовательно с выходным сигналом и это удвоенное напряжение запоминается на емкости C2.

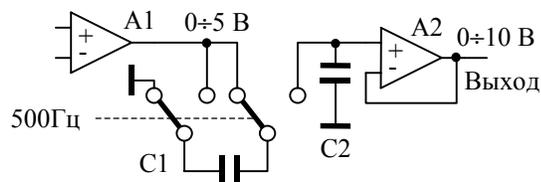


Рис.4. Схема удвоения напряжения.

Формирование отрицательной полярности осуществляется аналогичной схемой.

Микросхемы дельта-сигма преобразователей при всех своих достоинствах являются крайне чувствительными к температуре окружающей среды и изменениям напряжения питания. Для компенсации влияния внешних условий в микросхеме DAC1220 предусмотрена специальная процедура калибровки. Все точностные параметры микросхемы гарантируются производителем только после проведения процедуры калибровки. Точных критериев для определения момента проведения калибровки производитель не определяет. В справочных данных пишется следующее. Where high accuracy is important, re-calibration should be done on changes in temperature and power supply.

Ниже приводятся графики изменения выходного напряжения от температуры. Измерения производились следующим образом. Блок помещался в замкнутый объем и за счет собственного тепловыделения медленно нагревался. Благодаря медленному прогреву (процесс длился около двух часов), в объеме сохранялось стационарное температурное распределение. В процессе прогрева через некоторые промежутки времени (около 15 минут) измерялось выходное напряжение ЦАПа в нескольких точках (10 мВ, 0,625 В, 2,5 В и 10 В). Одновременно с измерением выходного напряжения измерялась и температура на печатной плате. Здесь

приводится три графика- изменение напряжения в точке 2,5В, изменение напряжения в точке 0,625В и изменение температуры.

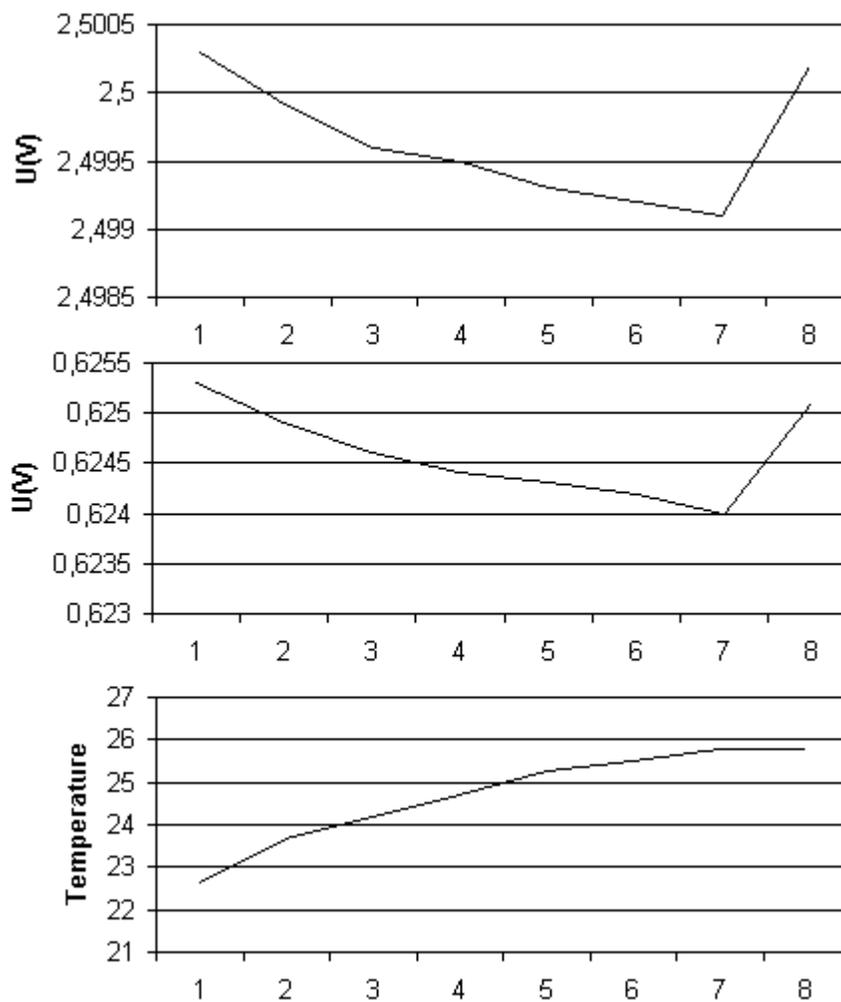


Рис.5. Зависимость выходного напряжения от температуры.

Из графиков видно, что при изменении температуры окружающей среды на 3 градуса, выходное напряжение ЦАПа изменилось примерно на 1 мВ. Это соответствует температурному дрейфу 30 ppm/°C. В конце цикла измерений блоку была дана команда калибровки ЦАПа. После проведения калибровки, выходное напряжение стало отличаться от первоначального

примерно на 10 мкВ (это лучше видно не по графику, а по числам, которые здесь не приводятся).

Проведенные измерения показали, что изменение температуры окружающей среды даже на три градуса, приводят (в отсутствии процедуры калибровки) к ошибке 0,01%. Таким образом, практически для любой требуемой точности, калибровка является обязательной. Вопрос лишь в том, насколько часто эту процедуру проводить.

Как это обычно бывает, лекарство имеет побочные эффекты. Каждый процесс калибровки осуществляется с некоторой ошибкой. Эффект наблюдался в различных разработках, использующих микросхему DAC1220. Ниже приводится запись выходного напряжения цифроаналогового тракта, когда код в микросхеме ЦАП не меняется (т.е. выходное напряжение не должно меняться), но периодически подается команда калибровки. Для

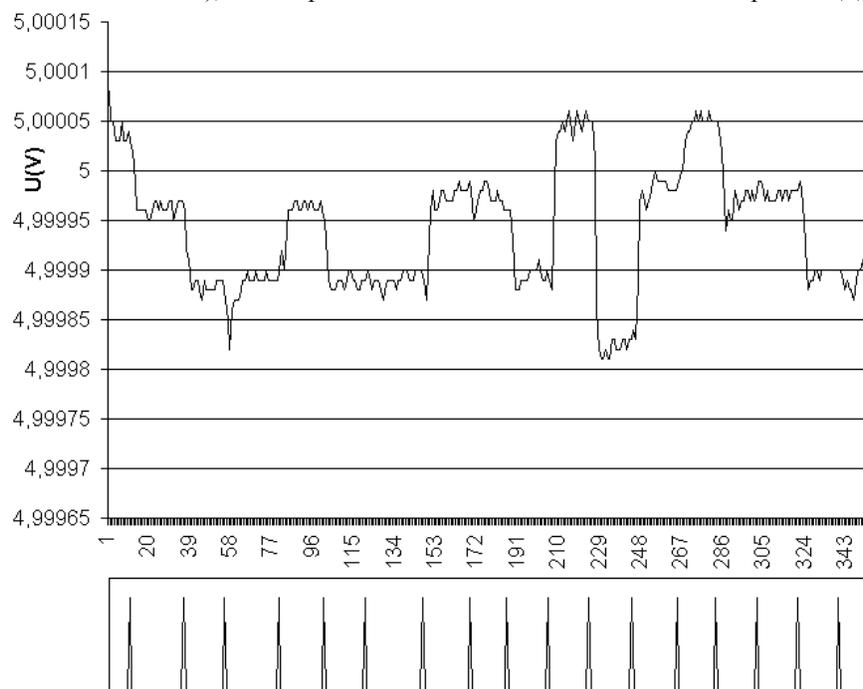


Рис.6. Изменение выходного напряжения при калибровке.

облегчения интерпретации картинка немного ниже выведена картинка с реперами, отмечающими момент подачи команды калибровки. Из картинок видно, что после некоторых процедур калибровки выходное напряжение не меняется совсем, иногда меняется на 50 мкВ, иногда даже на 500 мкВ. Скачки напряжения являются шумоподобными. Величина этих скачков укладывается в исходные требования к точности устройства.

Таким образом, используя недорогие и широко распространенные компоненты, удалось создать цифроаналоговый тракт с разрешением 20 бит и абсолютной точностью (при периодическом проведении процедуры калибровки) не хуже 0,01%.

Для получения лучшей точности устройства как раз и предназначен аналого-цифровой преобразователь и цифровая коррекция.

#### 4. Аналого-цифровой преобразователь и цифровая коррекция

Аналого-цифровой тракт построен по хорошо себя зарекомендовавшей и достаточно отработанной схеме (рис.7.), использованной в серии CANbus устройств [4, 5]. Преобразователь с системной калибровкой и качественным опорным источником (AD688B) без использования экзотических схемотехнических и программных приемов дает шумовое разрешение около 2 ppm и температурную стабильность шкалы не хуже 1+1,5 ppm/С. Это означает, что в лабораторных условиях и на ускорительных комплексах, где температура окружающей среды изменяется всего на несколько градусов, мы можем зарегистрировать ошибку цифроаналогового тракта 0,001%. "Лишние" входы мультимплексора в текущей версии устройства выведены на разъем и могут быть использованы для измерения внешних напряжений. Микроконтроллер обмеряет их на общих основаниях и запоминает в своей памяти и может выдать пользователю по соответствующему запросу.

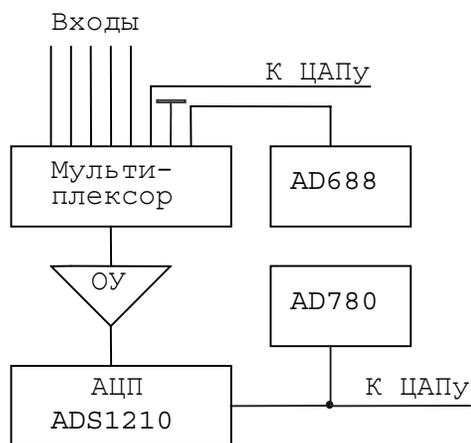


Рис.7. Блок-схема аналого-цифрового преобразователя.

Имея аналого-цифровой измеритель на порядок более точный, чем цифроаналоговый тракт, совсем несложно, имея на плате

микроконтроллер, компенсировать ошибки ЦАПа. Можно придумать и реализовать довольно много алгоритмов коррекции цифроаналогового тракта. В соответствии с исходными посылками, описанными выше, был использован довольно несложный механизм коррекции.

Микроконтроллер организует рабочий цикл измерителя, состоящий из калибровки системного нуля и масштаба и затем поочередное измерение всех 6-ти сигналов (5 внешних и напряжение ЦАПа). После измерения сигнала ЦАПа производится проверка- не было ли записи в ЦАП за время меньше времени установления тракта. Если такой записи от ЭВМ не было, то микроконтроллер вычисляет ошибку и вносит коррекцию (половину от измеренной ошибки).

Для проверки работы алгоритма была использована схема, показанная ниже.

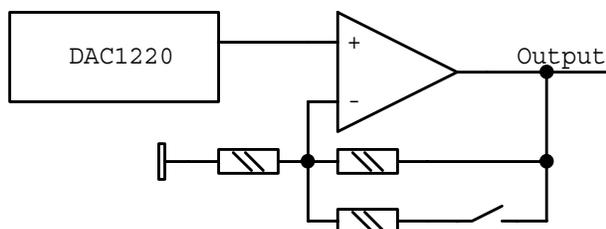


Рис.8. Схема проверки работы цифровой коррекции.

Поскольку алгоритму коррекции несущественна природа ошибки цифроаналогового тракта, будь то смещение нуля или ошибка масштаба, то в схему "аналоговой растяжки" была введена ошибка масштаба- к резистору обратной связи с помощью кнопки добавлялся внешний резистор. Поведение выходного напряжения ЦАПа устройства показано на рис.9.

После замыкания кнопки в выходном напряжении появлялась ошибка, которая затем компенсировалась системой коррекции. После размыкания кнопки возникала ошибка с противоположным знаком- введенная коррекция теперь стала излишней. На рисунке цена деления по вертикали- 500 мкВ, а по оси X приводится номер измерения.

Как видно из графика, внесенное в тракт возмущение, корректируется системой цифровой коррекции по экспоненциальному закону. Через несколько циклов коррекции величина ошибки сводится до нуля. Как упоминалось выше, алгоритму коррекции безразлична природа возникновения ошибки цифроаналогового тракта. Соответственно, алгоритм будет корректировать как температурное влияние, так и инфранизкочастотные шумы.

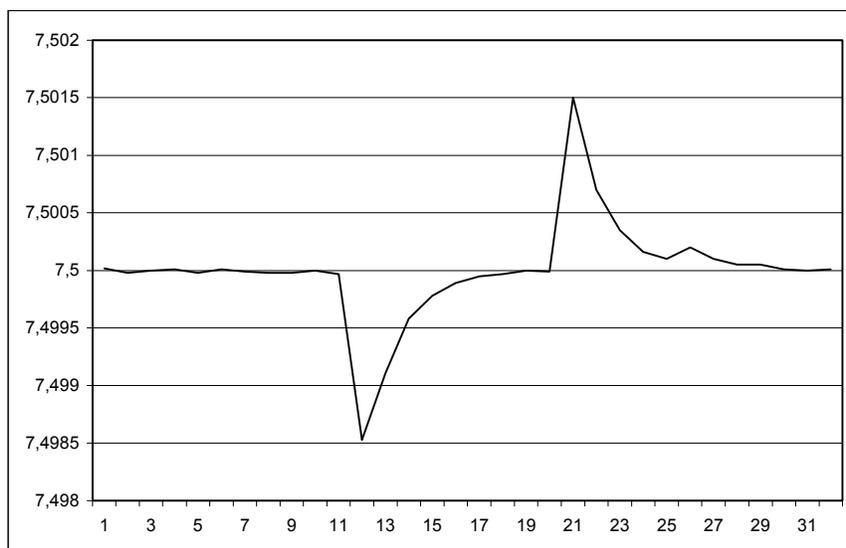


Рис.9. Отработка ошибки выходного напряжения ЦАПа.

Использование микроконтроллера позволило не только улучшить метрологию устройства (компенсация нелинейности, ошибки калибровки, дрейф ЦАПа), но и значительно упростить использование устройства пользователем, не лишая возможности продвинутого пользователя иметь доступ к дополнительным функциям. Для работы достаточно записать в устройство три байта данных и устройство выдаст на выходе соответствующее напряжение с высокой точностью. Цифровая коррекция включается автоматически. В то же время продвинутый пользователь имеет доступ к внутренним ячейкам микроконтроллера и специальными командами может достигнуть к дополнительному сервису (величина ошибки ЦАПа, которая была скорректирована процессором, измеренные напряжения с дополнительных входов АЦП и т.п.). Это достигается благодаря тому, что все общение пользователя ведется с программой в микроконтроллере.

Схема стыковки микроконтроллера с шиной VME реализована схожим образом с хорошо себя зарекомендовавшей схемой в устройстве VMEADC16 [6] и рассматриваться здесь не будет.

## 5. Заключение

Разработанное устройство удовлетворяет исходным требованиям, сформулированным выше и обеспечивает высокое разрешение, точность и температурную стабильность. При этом в устройстве используются недорогие компоненты и присутствуют всего два органа настройки-подстройка эталонного напряжения (AD688) и подстройка опорного напряжения AD780. Строго говоря, вторая подстройка не нужна, автор ввел ее из любви к искусству, чтобы минимизировать ошибку цифроаналогового тракта при отключении режима цифровой коррекции.

Ниже приводятся параметры разработанного устройства.

Параметр	Значение
Разрядность ЦАП	20 бит (плюс знак).
Время установления ЦАПа на полную точность (при переключении от -10 В до +10 В)	0.5 сек.
Точность во всем диапазоне температур (без цифровой коррекции)	0.01%
Точность во всем диапазоне температур (с цифровой коррекцией)	0.002%
Дрейф шкалы (без цифровой коррекции)	5 ppm/°C
Дрейф шкалы (с цифровой коррекцией)	1 ppm/°C
Выходное напряжение	±10 В
Сопrotивление нагрузки не ниже	10 КОм.
Разрядность АЦП	24 бита
Эффективное разрешение АЦП (rms)	22 бита
Смещение нуля АЦП в диапазоне температур не более	10 мкВ
Точность АЦП во всем диапазоне температур не менее	0.002%
Дрейф шкалы АЦП во всем диапазоне температур не более	1 ppm/°C
Диапазон входных напряжений АЦП	±10В
Входной ток АЦП не более	1 нА
Подавление дифференциального сигнала частотой 50 Гц не менее	60 дБ
Подавление дифференциального сигнала частотой 60 Гц не менее	48 дБ
Время измерения (интегрирования) АЦП	20 мс
Время сканирования всех каналов	1 сек

Вообще говоря, достигнутые параметры не являются предельно возможными для описанного устройства. Дальнейшее повышение точности ЦАПа может быть достигнуто вполне очевидными средствами. Механизм цифровой коррекции обуславливает точностные характеристики ЦАПа

возможностями аналого-цифрового преобразователя. Как было показано в тексте, точность АЦП обуславливается двумя факторами: стабильностью источника эталонного напряжения и шумами аналого-цифрового преобразователя. Влияние первого фактора может быть уменьшено использованием более качественного и, соответственно, более дорогого источника эталонного напряжения. Кроме того, можно измерять температуру эталонного источника (или окружающей среды) и вносить поправки в измеренное напряжение. Влияние шумов аналогового преобразователя может уменьшено методом усреднения измерений. Это относится как к обычным измерениям, так и к процедурам калибровки.

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

## Литература

- [1] *В.Р. Козак, Э.А. Купер, А.Н. Фисенко.* Набор устройств с интерфейсом CANbus для систем автоматизации физических установок. Препринт ИЯФ 2003-70.
- [2] *A.Batrakov, I.Ilyin, G.Karpov, V.Kozak, M.Kuzin, E.Kuper, V.Mamkin, N.Mezentsev, V.Repkov, A.Selivanov, and V.Shkaruba.* Control and data acquisition systems for high field superconducting wigglers// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 467-468 (2001) 202-205.
- [3] *V.K.Ovchar, E.A.Kuper, S.I.Zverev, V.R.Kozak.* Precision multiplexer for HALL's detector signals in VME standard// Automation, Control and Information Technology. IASTED International Conference, Novosibirsk, Russia, June 20-24, 2005, pp.76-78.
- [4] *В.Р. Козак, Э.А. Купер.* Прецизионный микропроцессорный контроллер для управления источниками питания. Препринт ИЯФ 2003-35.
- [5] *В.Р. Козак, М.М. Ромах.* Устройства с интерфейсом CANbus для систем автоматизации физических установок (блоки САС208, CURVV). Препринт ИЯФ 2004-68.
- [6] *В.Р. Козак.* Многоканальный прецизионный аналого-цифровой преобразователь в стандарте VME. Препринт ИЯФ 2004-69.
- [7] *E. Medvedko, J. Olsen, G. Leyh, S. Smith, C. Wermelskirchen, T. Straumann.* High resolution analog/digital power supply controller// Proceedings of 2003 Particle Accelerator Conference, pp.761-763.

В.Р. Козак

**Прецизионный цифроаналоговый  
преобразователь в стандарте VME**

V.R. Kozak

**Precise VME  
digital-to-analog converter**

ИЯФ 2006-44

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 4.09.2006 г.

---

Сдано в набор 5.09.2006

Подписано в печать 6.09.2006 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.3 печ.л., 1.0 уч.-изд.л.

Тираж 95 экз. Бесплатно. Заказ № 44

---

Обработано на IBM PC и отпечатано  
на ротапринтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН  
*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*