

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

В.Р. Козак

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ  
ПРЕЦИЗИОННЫЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ  
В СТАНДАРТЕ VME

ИЯФ 2004-69

Novosibirsk  
2004

**Многоканальный прецизионный  
аналого-цифровой преобразователь  
в стандарте VME**

*В.Р. Козак*

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

**Аннотация**

В препринте описан многоканальный прецизионный (0,003%) аналого-цифровой преобразователь в стандарте VME. Устройство содержит в своем составе микроконтроллер, который предоставляет пользователю высокоуровневые функции, что существенно облегчает использование устройства. В работе рассмотрены особенности аппаратного построения, а также встроенного программного обеспечения.

**Multichannel precise analog-to-digital converter for VME**

*V.R. Kozak*

**Abstract**

VME analog-to-digital converter with accuracy 0,003% is described. The device includes a microcontroller which provides high level functions. It simplified designing a software by user. 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, 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 [1], систему магнитных измерений. В большинстве таких систем довольно остро ощущалась нехватка прецизионного аналого-цифрового преобразователя. Это и инициировало разработку аналого-цифрового преобразователя в стандарте VME.

Предполагаемая область использования аналого-цифрового 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. Преобразователь должен эффективно подавлять помехи с частотой питающей сети.
4. Количество входных каналов не менее 16.

Аналого-цифровой преобразователь, удовлетворяющий описанным требованиям, был разработан и успешно применен в новой системе магнитных измерений. Ниже описывается построение этого устройства и основные особенности устройства.

## 2. Структура прецизионного аналого-цифрового преобразователя

При разработке устройства было принято решение использовать при построении аналоговой части технические решения, отработанные в блоке CDAC20, хорошо себя зарекомендовавшие как при производстве, так и в эксплуатации [2].

Выбор исполнения цифровой части представлялся менее очевидным. Как правило, в подобных случаях "главная" микросхема, в данном случае микросхема сигма-дельта АЦП, с помощью программируемой логики стыковалась с шиной VME. Этот подход является самым экономным с точки зрения аппаратных затрат и предоставляет пользователю абсолютно все возможности преобразователя. Однако, даже такая несложная микросхема как ADS1210, которую предполагалось использовать в преобразователе, контролируется несколькими десятками битовых флагов. Разобраться в значении всех битовых флагов и последовательности состояний микросхемы преобразователя является для программиста весьма затруднительным и неизбежно влечет за собой массу ошибок и недоразумений в процессе написания и отладки программного обеспечения.

Конечно, существует апробированный путь отделения программиста от сложной аппаратуры специальным программным обеспечением- драйвером. Однако, после анализа возможных применений устройства, этот путь был признан неперспективным. Первые приложения предполагали использование различных операционных систем (VxWorks, LINUX, RTEMS) и различные режимы работы аналого-цифрового преобразователя. Таким образом, требуется персональный драйвер под каждое приложение. Кроме того, как правило программиста не устраивает поставляемый с устройством драйвер и он почти всегда начинает его модифицировать, вмешиваясь таким образом в алгоритм взаимодействия программного обеспечения с аппаратурой. Поэтому более экономичным представлялось аппаратное решение проблем. Введение в устройство микроконтроллера позволило бы скрыть сложные особенности преобразователя, гарантировать проведение необходимых процедур и в то же время предоставить программисту механизм общения с одной стороны простой, а с другой стороны обеспечивающий достаточный набор функций.

Аппаратное решение имело ряд достоинств, облегчающих и удешевляющих разработку. Во-первых, большая часть программного обеспечения микроконтроллера могла быть заимствована из блока CDAC20 [2] (имеются ввиду процедуры обслуживания микросхемы преобразователя, обработка данных, реализация основных измерительных алгоритмов). Во-вторых, реализация "аппаратного драйвера" осуществлялась единственный раз, после чего не требовалось писать сложные драйверы с избытком взаимосвязанных процессов. Написание таких простых драйверов вполне можно было доверить программисту, поскольку основные механизмы функционирования преобразователя оказывались скрыты в программном обеспечении микроконтроллера.

Структура разработанного устройства показана на следующем рисунке.

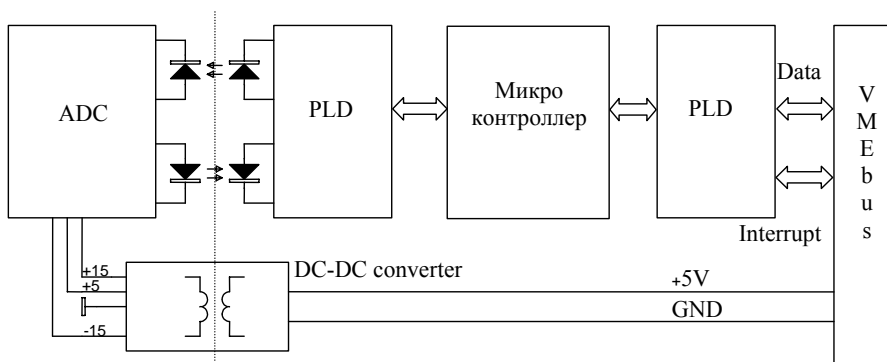


Рис.1. Структурная схема аналого-цифрового преобразователя.

Из приведенной схемы видно, что преобразователь полностью изолирован от магистрали VME. Обмен данными ведется между шиной VME и микроконтроллером с одной стороны и между микроконтроллером и преобразователем - с другой. Для облегчения реализации обменов в блоке используется микросхема программируемой логики. Физически это единственная микросхема, но логически (в уравнениях) это два независимых и практически не связанных блока. Правая часть (на рисунке) микросхемы совместно с дискретной логикой осуществляет интерфейс между микроконтроллером и шиной VME. Левая часть (на рисунке) микросхемы осуществляет обмен данными между микроконтроллером и преобразовательной частью (обмен последовательными данными с микросхемой АЦП, управление входным мультиплексором).

Аналоговая часть гальванически изолирована от остальной части блока с помощью преобразователя, предоставляющего аналоговой части все необходимые напряжения питания, и оптронов, транслирующих данные от микроконтроллера и к нему. Гальваническая изоляция представлялась очень полезной в прецизионных приложениях, таких как система магнитных измерений.

### 3. Аналого-цифровой преобразователь

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

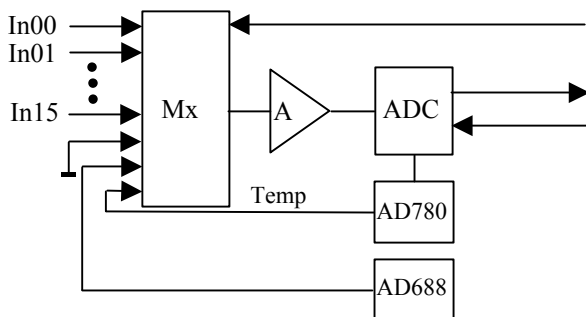


Рис.2. Блок-схема аналоговой части преобразователя.

Аналого-цифровой преобразователь состоит из:

- аналогового мультиплексора, коммутирующего входные сигналы и служебные напряжения на вход АЦП;
- инструментального усилителя, согласующего уровень входных сигналов ( $\pm 10$  В) с рабочим диапазоном микросхемы АЦП ( $0 \div 5$  В);
- микросхемы аналогового преобразователя;
- источника опорного напряжения 2.5 В, необходимого для нормального функционирования микросхемы АЦП;
- прецизионного опорного напряжения +10В, используемого для калибровки шкалы прибора.

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.

Для согласования входного диапазона микросхемы преобразователя с требуемым диапазоном обрабатываемых напряжений ( $\pm 10$  В) 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 (типичная 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 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 микроконтроллера, 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 2.5 В (AD780). Эта микросхема имеет вывод температурного датчика, который подключен к одному из входов мультиплексора. 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.

Для подавления этого эффекта был применен очень простой прием. Один из входов микросхемы АЦП был соединен с «землей». «Системная калибровка» измерителя трактует такое соединение как очень большое «смещение нуля», которое, тем не менее, удастся компенсировать. Таким образом, эта зона (шириной несколько милливольт) смещается за границы рабочего диапазона.

Типичная шумовая дорожка для АЦП показана на рис.3. Измерения производились в одноканальном режиме, время измерения 20 мс/отсчет. Напряжение в вольтах, цена деления по вертикали- 10 микровольт.

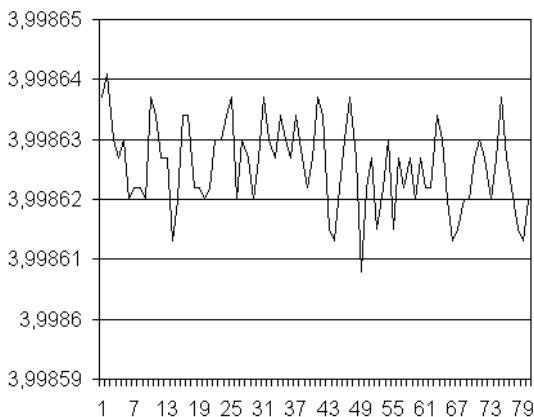


Рис.3. Шумовая дорожка преобразователя (20 мсек/отсчет).

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 микроконтроллером).

Полезно также учитывать, что прибор эффективно подавляет помехи с частотами кратным частоте измерений. Типичная частотная характеристика (для времени измерения 20 мсек) показана на рисунке 4. Она взята из описания микросхемы [3].

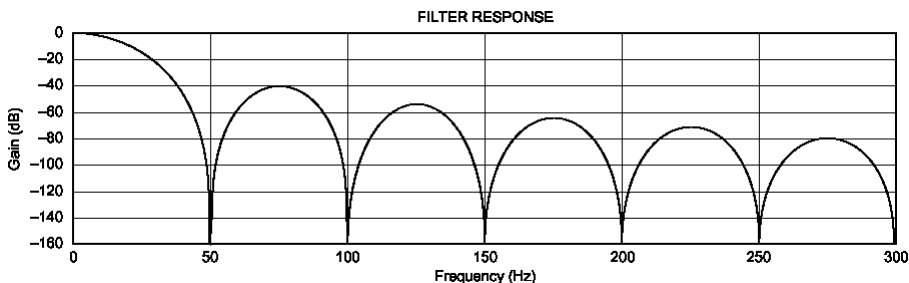


Рис.4. Частотная характеристика преобразователя при времени интегрирования равном 20 мсек.



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.

#### **4. Стыковка устройства с шиной VME**

Как отмечалось выше, при разработке устройства было решено использовать наработанное программное обеспечение блока CDAC20. Этим практически однозначно обуславливался выбор микроконтроллера. Во-первых, это должен быть член семейства MCS-51, поскольку программное обеспечение блока CDAC20 было написано как раз для члена этого семейства. Во-вторых, это должна быть быстрая модель. Классические версии микроконтроллера способны обслужить запрос магистрали за десятки-сотни микросекунд. Это приведет к построению обмена микроконтроллера с шиной VME очень сложным образом, например, последовательность двух команд должна включать в себя ожидание исполнения предыдущей команды. При таком быстродействии исполнительного модуля, программное обеспечение управляющей ЭВМ резко теряет эффективность.

Для реализации эффективного интерфейса с шиной VME был выбран относительно новый микроконтроллер DS89C420. Его отличительная особенность - полная конвейеризация вычислительного тракта и способность исполнять машинную команду за 1 – 2 машинных цикла. При таком быстродействии контроллера, открывается возможность обслуживать запросы магистрали за 5 – 15 мсек. Как известно, шина VME является асинхронной шиной, исполнительное устройство может "растянуть" цикл записи/чтения магистрали на 10 – 20 мсек.

Блок-схема интерфейса микроконтроллера с магистралью VME выглядит следующим образом (см. рис.5).

Обмен микроконтроллера с шиной VME производится посредством 16-разрядного буферного регистра. Любой обмен начинается с записи в этот регистр. В микросхеме PLD реализован следующий механизм: запись в регистр обмена взводит флаг, который подается на вход прерывания микроконтроллера. Подпрограмма обслуживания прерывания считывает оба байта из регистра обмена и, в соответствии с протоколом, исполняет запрошенное действие, затем перезаписывает младший байт регистра обмена, что свидетельствует о завершении обмена. После этого флаг обмена сбрасывается. После завершения процедуры обмена, логика PLD выдает на шину подтверждение цикла (Dtack). Таким образом ожидание шиной завершения обмена с микроконтроллером заканчивается. Одна из команд микроконтроллеру означает запрос данных из внутренней памяти (младший байт при этом интерпретируется как адрес). В этом случае микроконтроллер

в процедуре обслуживания прерывания перезаписывает оба байта регистра обмена запрошенной информацией. Информация, запрошенная из микроконтроллера, может быть считана из регистра обмена. Цикл чтения регистра не вовлекает в процесс микроконтроллер и поэтому для него задержки подтверждения цикла не требуется.

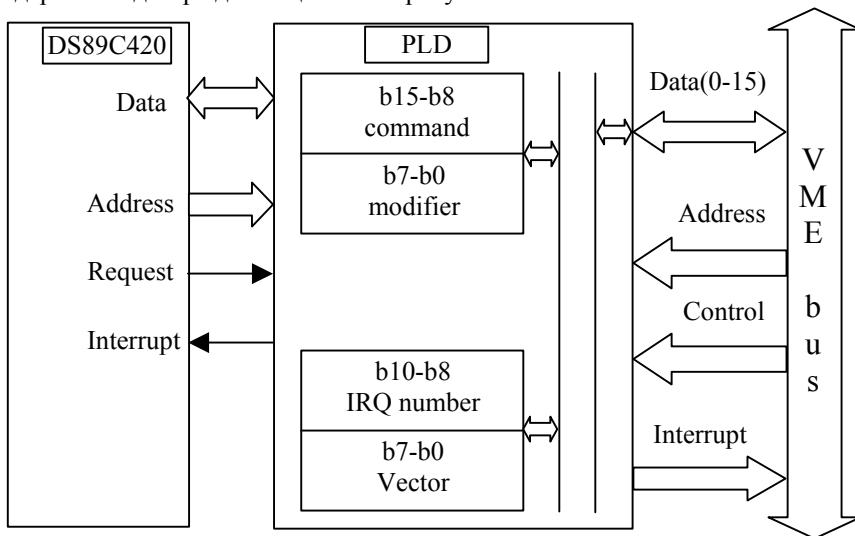


Рис.5. Блок-схема интерфейса микроконтроллера с шиной VME.

Кроме регистра обмена, в интерфейсе реализован еще один двухбайтовый регистр- регистр прерываний. В старшем байте указывается номер линии IRQ, которую разрешается использовать (номер 0 запрещает прерывания от блока), а в младшем байте содержится вектор прерывания, который будет выведен на шину VME в цикле обслуживания прерывания. Этот регистр может быть записан и прочитан программистом без каких-либо хитростей. Участие микроконтроллера в этом механизме совсем небольшое. Единственной линией микроконтроллер инициирует механизм запроса прерывания. Все остальное реализуется аппаратно микросхемой PLD.

Время обслуживания микроконтроллером запроса с шины VME не превышает 10 мксек. Следует отметить, что имеется возможность это время сократить. Во-первых, процессор имеет встроенный удвоитель тактовой частоты, который включается программно. Кроме этого, на процессор подается тактовая частота 10 МГц, хотя на плате устройства присутствует и частота 20 МГц, которая вполне подходит этому процессору. Таким образом, если потребуется реализовать в процедурах прерывания более сложные алгоритмы, этому нет аппаратных препятствий.

## 5. Встроенное программное обеспечение

Как отмечалось выше, обслуживание запросов шины VME микроконтроллер осуществляет по прерываниям. Соответственно, обслуживание аналого-цифрового преобразователя и управление входным мультиплексором производится в фоновом режиме. Взаимодействие основной программы с командами от VME реализовано с помощью механизма флагов. Существует ряд флагов, часть из которых управляется подпрограммой обслуживания запросов VME, а часть, напротив, основной программой.

С точки зрения программиста управлять блоком очень просто. Существует несколько команд, управляющих режимами функционирования. Это команды записи номеров начального и конечного каналов, времени интегрирования, команда старта измерений, сопровождаемая модификатором команды. Однако, для чтения предоставляется не измеренная информация из АЦП, а предоставляется доступ ко всей внутренней памяти микроконтроллера. Использование всей карты памяти дает возможность организовать различные способы взаимодействия с блоком.

Основным режимом работы является режим многоканальных измерений. При запуске прибора в режиме многоканальных измерений, устройство производит калибровку, затем поочередно измеряет входные каналы с первого по последний, указанные предыдущими командами от ЭВМ. Каждое измерение укладывается в определенную область внутренней памяти (т.е. каждому каналу соответствует определенная ячейка памяти). При соответствующем модификаторе команды, после измерения последнего указанного канала, модуль начинает измерения сначала, причем в обязательном порядке производит калибровку масштаба и смещения нуля, что гарантирует постоянное поддержание точности прибора. Модуль может выставлять запрос на прерывание после каждого измерения, после цикла измерений (в конце сканирования указанных каналов), либо не выставлять вообще.

Обмен информацией может производиться следующими образами.

1. Блок непрерывно измеряет указанные каналы, укладывает измеренную информацию в соответствующие области памяти и не генерирует запрос на прерывание. Это, так называемый, пассивный режим. Когда ЭВМ хочет узнать значение какого-либо входного напряжения, она просто читает соответствующую область памяти микроконтроллера. Это будет наиболее "свежее" значение.
2. Блок сканирует все указанные каналы и в конце измерительного цикла генерирует запрос на прерывание, чтобы ЭВМ могла прочитать сразу все измеренные каналы.

3. Блок сканирует указанные каналы и генерирует запрос на прерывание после завершения измерения каждого входного канала. При этом ЭВМ может считывать информацию не из специфического адреса, а из временного аккумулятора, это может упростить программу.
4. Совсем примитивный режим для программистов не умеющих работать с прерываниями. Блок запускается в режим измерений, а программа считывает байт флагов и проверяет бит "аккумулятор обновлен". После этого программа считывает информацию текущего измерения из аккумулятора, а флаг "аккумулятор обновлен" автоматически сбрасывается.

Карта памяти (документированные адреса) включает в себя различную дополнительную информацию- номер аппаратной и программной версии, номер текущего измеряемого канала, аккумулятор, набор битовых флагов, отмечающих различные фазы измерений, в том числе флаг обновления аккумулятора.

Режим одноканальных измерений исходно во всех аналогичных приборах предназначался для регистрации медленно меняющихся напряжений. Однако, этот режим оказывается полезным при использовании измерителя совместно с внешним коммутатором. Такое применение, в частности, блок нашел при создании стенда магнитных измерений. В этом случае коммутация входных каналов осуществляется отдельным блоком, управляемым от магистрали VME, а измеритель работает в одноканальном режиме. В этом случае на обслуживающую программу ложится дополнительная нагрузка- программа должна после изменения номера измеряемого канала отбросить 3 первых значения.

## 6. Основные параметры блока VMEADC16

Число входных каналов	16
Разрядность АЦП	23 бит
Разрешающая способность АЦП	23 бит
Эффективное количество разрядов АЦП при времени интегрирования 1 мсек	15 бит
Эффективное количество разрядов АЦП при времени интегрирования 20 мсек	19 – 20 бит
Точность АЦП в диапазоне рабочих температур	0.003 %
Диапазон входных напряжений АЦП	$\pm 10$ В
Входной ток АЦП	$< 10$ нА
Сумма синфазной и дифференциальной составляющей сигнала	$\pm 11$ В
Подавление синфазного сигнала	80 дБ
Время измерения	1, 2, 5, 10, 20, 40, 80, 160 мсек

## 7. Заключение

Опыт реализации описанных выше подходов полностью подтвердился практикой. При качественном изготовлении печатной платы и аккуратном монтаже устройство начинает работать сразу же и после включения даже без подстройки (единственной на плате) имеет точность не хуже 0,05%. Опыт написания программного обеспечения также подтвердил правильность исходных принципов. Программисты опробовали различные алгоритмы взаимодействия с измерителем без особых проблем.

Сейчас первый блок используется в стенде для магнитных измерений.

Подробное описание и руководство для пользователя устройства можно найти на институтском WEB-сайте по адресу

<http://www.inp.nsk.su/~kozak/designs/designs.htm>

## Литература

- [1] *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, v.467-468 (2001) 202-205.
- [2] *В.Р. Козак, Э.А. Кунер.* Прецизионный микропроцессорный контроллер для управления источниками питания, Препринт ИЯФ 2003-35.
- [3] PDS-1284C, (ADS1210, ADS1211 description) Burr-Brown, 1996.

*В.Р. Козак*

**Многоканальный прецизионный  
аналого-цифровой преобразователь  
в стандарте VME**

*V.R. Kozak*

**Multichannel precise analog-to-digital converter for VME**

ИЯФ 2004-69

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 26.11.2004

---

Сдано в набор 29.11.2004

Подписано в печать 29.11.2004

Формат 60x90 1/16 Объем 0.9 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 69

---

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