

УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

В.Р. Козак

КОНТРОЛЛЕР БЫСТРОПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ
ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ
С ИНТЕРФЕЙСОМ CANBUS

ИЯФ 2009-20

НОВОСИБИРСК
2009

Контроллер быстроперестраиваемых источников питания с интерфейсом CANbus

В.Р. Козак

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

Аннотация

В ИЯФ СО РАН системы автоматизации строящихся и модернизируемых электрофизических установок в последние годы базируются на встраиваемых устройствах с интерфейсом CANbus. Появление проектов ускорительных комплексов с коротким рабочим циклом потребовало разработки источников питания с возможностью быстрой перестройки выходного тока в соответствии с заданным законом, а также соответствующих контроллеров. В данной работе описывается контроллер быстроперестраиваемого источника питания с интерфейсом CANbus, выполненный в евроконструктиве. Приводятся основные параметры, результаты тестовых испытаний.

Controller for fast ramping power supplies with CANbus interface

V.R.Kozak

Abstract

Modern control systems of BINP facilities are based on embedded devices with CANbus interface. Latest projects (HITS and similar) require using fast ramping power supplies and respective controllers. There is described a new euro mechanical device with CANbus interface. There is presented main parameters and results of testing the device.

© Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН

1. Введение

В ИЯФ проводятся работы по созданию новых (ТНК, ЛСЭ, Инжекционный комплекс) и модернизации действующих (ВЭПП-2000) электрофизических установок. Системы автоматизации этих установок базируются на устройствах с CANbus интерфейсом, встраиваемых в оконечное оборудование (embedded devices) [1, 2, 3].

Одной из наиболее сложных функций, выполняемых системой автоматизации на ускорительном комплексе, является процесс ускорения пучка частиц. В процессе ускорения одновременно должны перестраиваться все (или большая часть) магнитных элементов ускорительного кольца, а также ряд параметров ВЧ-системы. Учитывая, что ускорительное кольцо часто содержит несколько сотен перестраиваемых магнитных элементов (поворотные магниты, линзы, корректирующие обмотки) становится понятным, что процедура ускорения налагает достаточно жесткие требования на управляющие устройства, на пропускную способность интерфейсных трактов, а также на программное обеспечение. В качестве примера можно привести график изменения тока источника питания поворотных магнитов малого накопителя комплекса ТНК [3] в течение рабочего цикла.

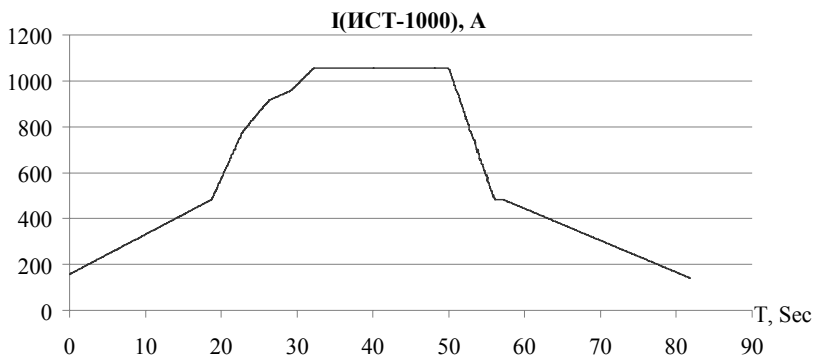


Рис. 1. Изменение тока поворотных магнитов бустера ТНК в течение рабочего цикла.

График иллюстрирует «легкий случай» описываемой проблемы. Подобные рабочие циклы легко реализуются методом «раздачи» управляющих воздействий от компьютера к управляющим блокам. Каждые 100 мсек управляющий компьютер заносит в цифроаналоговые

преобразователи, управляющие источниками питания, очередные значения. При количестве одновременно перестраиваемых каналов не более 100 эта задача легко выполняется на любых управляющих компьютерах с практически любыми интерфейсами к конечному оборудованию.

В случае требований меньшей дискретности управляющих воздействий и/или существенно большего количества одновременно управляемых каналов такой способ управления малопригоден. Такая ситуация имеет место на комплексе ВЭПП-4 [4], где только магнитная система имеет свыше трехсот управляемых источников питания и требования на дискретность изменения довольно высокие. В таких случаях требования на тракт передачи данных становятся неприемлемо высокими- время передачи данных управляемому каналу оказывается менее 100 мксек. С аппаратной точки зрения это сегодня не представляет проблемы, но не следует забывать, что при описанном способе работы такие же высокие требования налагаются на программное обеспечение, включая операционную систему.

Существует несколько путей решения этой проблемы. В нашем институте был выбран вариант с интеллектуальными контроллерами источников питания. Управляющий компьютер заранее загружает в эти контроллеры программу перестройки цифроаналоговых преобразователей во времени. После одновременного старта всех контроллеров они осуществляют перестройку источников питания автономно. Такой вариант был вполне успешно апробирован на комплексе ВЭПП-4 в 90-х годах [5].

Набор блоков с интерфейсом CANbus разработанный в институте [6] реализует эти функции, что позволяет эффективно решать большинство задач автоматизации электрофизических установок.

Однако, в последние годы появился ряд проектов [7,8], в которых требования на скорость перестройки магнитного поля существенно выше, чем на установках предыдущих поколений. Если характерное время перестройки основного ускорительного кольца комплекса НИС составляет около одной секунды, то рабочий цикл бустера предполагается равным 10-ти герцам. Ускорение рабочего цикла на два-три порядка потребовало разработки как новых источников питания элементов магнитной системы, так и соответствующих контроллеров для них.

В данной работе описывается контроллер источника питания, разработанный для проектов ускорителей с быстро перестраиваемой магнитной системой.

2. Структурная схема контроллера СЕАС121

Источник питания для магнитной системы ускорительного комплекса представляет из себя перестраиваемый источник тока. Требования как к точности, так и к стабильности выходного тока на «полочках» (режим инжекции и режим полной энергии) являются довольно высокими. Типичным требованием для поворотных магнитов и линз является величина

10^{-4} , а иногда и 10^{-5} . Для источников питания корректирующих магнитов, как правило, достаточно точности 10^{-3} .

Из опыта эксплуатации магнитных систем ускорительных комплексов в нашем институте, требование к монотонности изменения выходного напряжения цифроаналогового преобразователя 10^{-3} и соответствующая точность эмуляции требуемой кривой представляются вполне достаточными.

Кроме задания тока в магнитный элемент требуется контролировать и его фактическое значение. С физической точки зрения достаточно измерять только ток, но многолетний опыт создания и эксплуатации таких систем требует измерять и напряжение на нагрузке. Это позволяет с помощью управляющего компьютера производить автоматическую диагностику ряда неисправностей (замыкание магнитного элемента, отключение водяного охлаждения и, соответственно, перегрев магнита и т.п.). Измерение тока в нагрузке (на «полочке») должно осуществляться с точностью не меньшей, чем он задается, а в реальной практике принято иметь запас точности измерений. Измерение напряжения на нагрузке может производиться с меньшей точностью. Измерения в процессе перестройки тока тоже, как правило, никогда не специфицируются, а в ряде ускорительных комплексов и не производится с целью уменьшения трафика в процессе ускорения. В старых системах автоматизации задание тока и его измерения решались как отдельные задачи и обычно раздельными устройствами. В современных системах встраиваемые контроллеры источников питания содержат все необходимые подсистемы в одном устройстве.

Измерение значения с разрешением 10^{-4} – 10^{-5} без использования интегрирующего или сигма-дельта АЦП представляется проблематичным вследствие большого уровня помех. Поэтому для измерения тока на «полочке» разумно использовать именно микросхемы сигма-дельта технологии для гарантированности точности и достоверности этих измерений. В то же время представляется крайне полезным иметь возможность «осциллографических» измерений тока источника питания в процессе подъема энергии пучка. Здесь представляется логичным использование параллельного измерителя с технологией поразрядного уравнивания. Однако, возможен и другой подход. Нагрузка источников питания является индуктивной и высокочастотная составляющая тока практически отсутствует. В то же время наводки на сигнальные трассы (даже внутри одной корзины) являются преимущественно высокочастотными. Вместо использования дополнительного измерителя и фильтрации высокочастотных помех можно попробовать использовать имеющийся измеритель с технологией сигма-дельта с коротким временем интегрирования. Время дискретизации 1 мсек является легко достижимым, а это дает достаточное количество точек «осциллограммы» для оценки качества источника питания при перестройке тока.

Представляется целесообразным наложить на проект еще ряд дополнительных требований. Все рассматриваемые новые проекты включают в себя смесь как быстро перестраиваемых источников, так и множество относительно медленных, которые управляются линейкой разработанных устройств с интерфейсом CANbus. Соответственно, интерфейсом обмена с управляющим компьютером мы выбираем CANbus и предусматриваем программную совместимость с остальными устройствами, а также аппаратную совместимость. Имеется в виду идентичные диапазоны входных и выходных сигналов, а также разводка соединительного разъема. Разрабатываемое устройство по разъему совпадает с популярной моделью CEAC124, в котором используется один цифроаналоговый канал (канал 0).

3. Цифроаналоговый преобразователь контроллера

Кривая изменения тока в течение рабочего цикла, показанная на рис.1 изначально предполагает кусочно-линейную реализацию, что довольно легко выполнить. Интерес представляет более сложная кривая. В частности, источник питания отклоняющих магнитов бустера комплекса HTS предполагается делать по резонансной технологии. Как следствие, ток в магнитах будет иметь синусоидальную форму. Соответственно все корректора и линзы кольца также должны питаться синусоидальным током, возможно с некоторыми искажениями.

Рассмотрим случай кусочно-линейной интерполяции синусоидального сигнала. Требуемая кривая разбивается на какое-то количество отрезков, каждый из которых заменяется прямой линией. Предположим также, что цифроаналоговый преобразователь способен формировать идеальные прямые линии. Для простоты анализа примем, что длина отрезков по оси X (времени) одинакова.

На рисунке 2 иллюстрирован пример интерполяции. Фрагмент синусоидального сигнала (от 0 до $\pi/2$) разбит на 5 отрезков, которые эмулируются прямыми отрезками. Точками отмечены узлы интерполяции.

Очевидно что наибольшее несовпадение между требуемой синусоидой и прямыми отрезками возникнет в той зоне, где кривизна синусоиды (вторая производная) является максимальной – в районе максимума и минимума.

Максимально возможную ошибку для этого случая подсчитать довольно легко. Самый «неудачный» случай интерполяции – это если отрезок прямой будет эмулировать вершину синусоиды (рис.3).

На самом деле максимально возможная ошибка может быть уменьшена различными способами. Можно, например, использовать отрезки не равной длины, а переменной. Это уже увеличивает точность интерполяции в несколько раз.

Таким образом, можно констатировать, что стандартной для CANbus линейки устройств длины файла (40 точек) вполне достаточно для эмуляции синусоидального сигнала.

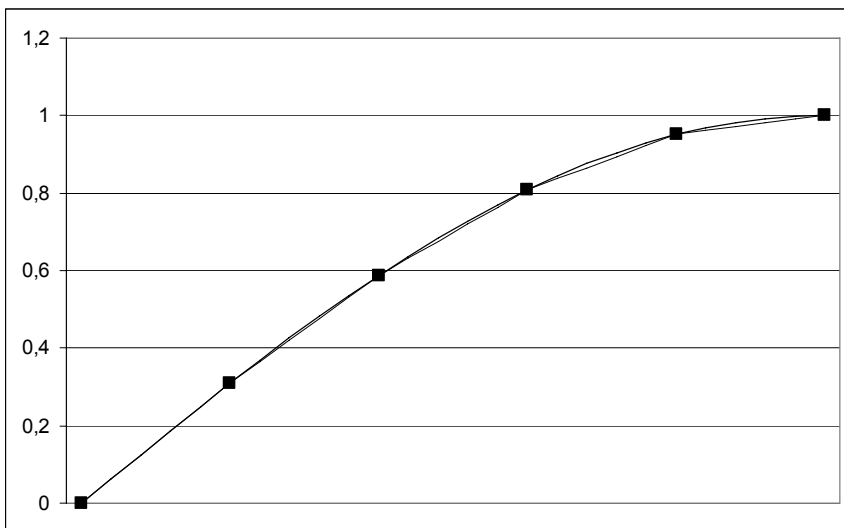


Рис. 2. Кусочно-линейная интерполяция для синусоидального сигнала.

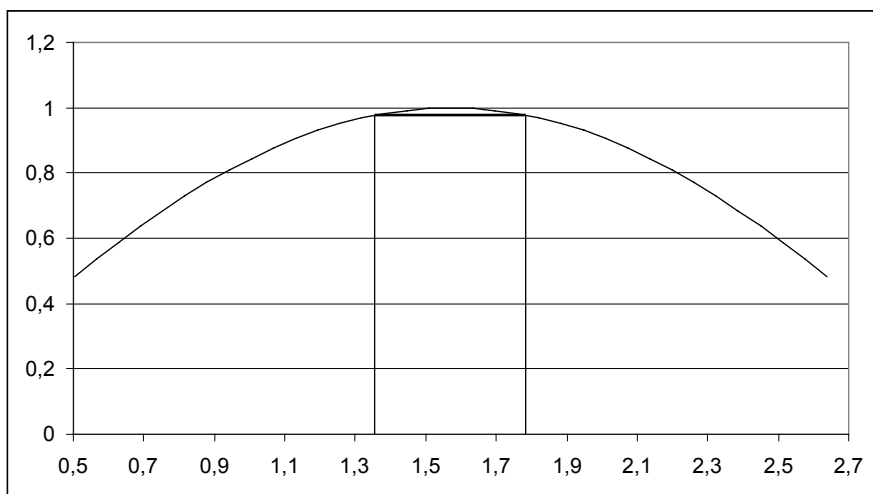


Рис. 3. К расчету ошибки интерполяции.

Предполагаемая длина файла устройства, описывающая точки интерполяции, была принята за 40 записей (аналогично всем предыдущим разработкам), т.е. полный период синусоиды (2π) описывается 40 точками (отрезками). Очевидно, для нашего случая максимальная ошибка (на середине эмулируемого отрезка) составляет $1 - \cos(2\pi/80) = 0.003$ (или $\pm 0,0015$).

Существует и другой источник погрешности интерполяции. Рассмотрим следующий рисунок 4.

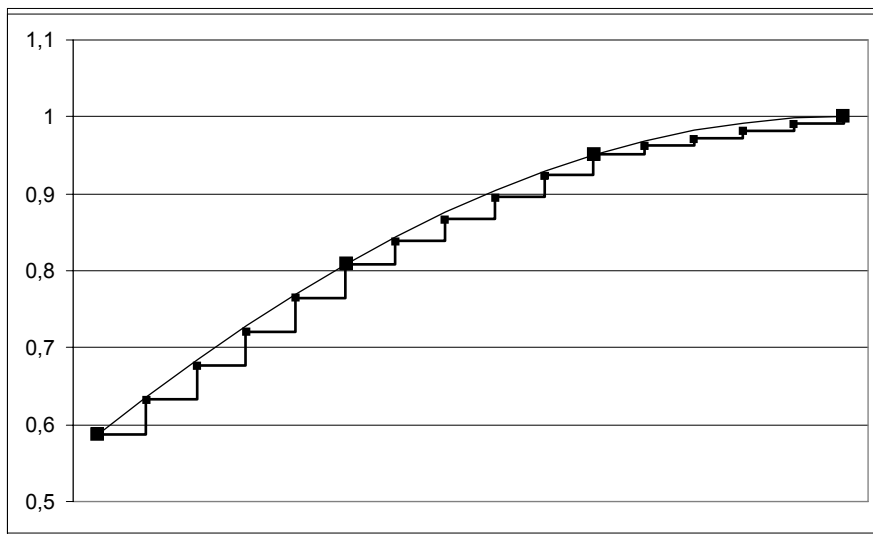


Рис. 4. Обработка прямого отрезка ЦАПом.

Любая реализация цифроаналогового преобразователя имеет конечную скорость отработки и конечную дискретность. Соответственно, идеальные прямые отрезки, рассмотренные ранее, на самом деле представляют собой последовательность «ступенек». Величина вертикального скачка определяется как разрядностью ЦАПа (для 16-ти разрядов эта ошибка сводится к приемлемой), так и интервалом между изменениями кода. Ошибка, вызванная временем дискретизации, является максимальной в зоне наиболее быстроизменяющегося сигнала. Для синусоиды – это зона около нуля. Ошибку можно оценить по формуле $\sin(2\pi \cdot T_q / T_c)$, где T_q – время дискретизации (квант времени), а T_c – время периода синусоиды. При разработке контроллера временной квант был выбран величиной 100 мкс. Для систем с циклом 1 Гц ошибка не превышает 0.0006, а для машин с 10-герцовым циклом – не более 0.006. Выходной сигнал цифроаналогового преобразователя обрабатывается интегрирующей цепочкой, что сглаживает ступеньки, не увеличивая динамической погрешности (рис.5).

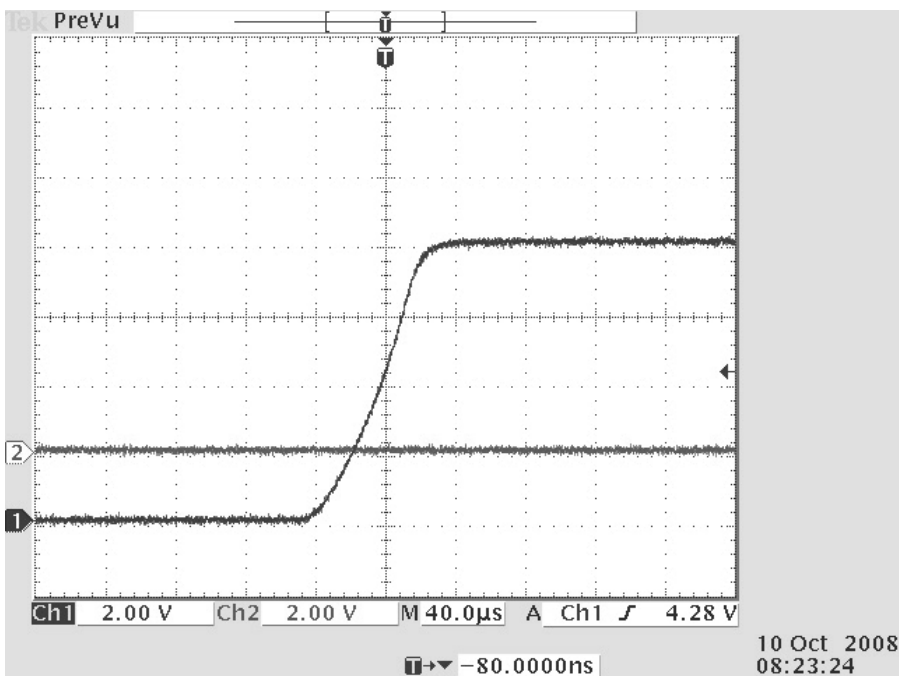


Рис. 5. Выходной сигнал ЦАПа.

4. Аналого-цифровой преобразователь контроллера

Аналого-цифровой преобразователь предыдущих разработок был ориентирован на приложения с квазипостоянными напряжениями и был оптимизирован с точки зрения минимальной себестоимости в производстве и наладке. Все точностные параметры гарантировались только при времени интегрирования 20 мсек или больше. Использование более коротких времен предназначалось только для качественной оценки величины пульсаций источников питания. Поэтому точность амплитудных измерений могла быть хуже процента и никакой синхронизации с сигналом не предусматривалось.

Намеченная область применения устройства СЕАС121 предполагает во-первых, синхронизацию измерений с входным сигналом, а во-вторых-реализацию прецизионных измерений с достаточно высокой частотой дискретизации. В качестве микросхемы преобразователя была выбрана ADS1210. Это ограничило минимальный интервал дискретизации величиной 1 мсек. Этой величины вполне достаточно для измерения реальных сигналов в источниках питания магнитной системы. Схема аналогового тракта была оптимизирована с точки зрения быстродействия.

В процессе работы ускорительного комплекса интерес представляют два сорта измерений – прецизионное измерение тока источника питания на «полочке» (см. рис.1) в конце цикла ускорения или перед инъекцией в ускорительное кольцо, а также форма тока в процессе ускорения. Первое измерение должно производиться в каждом рабочем цикле и с высокой точностью. Форма тока в рабочем цикле («осциллограмма») нужна, как правило, при разбирательствах с неисправностями и в ряде специфических приложений. Вообще говоря, стандартные режимы разработанных ранее контроллеров в большинстве случаев вполне удовлетворяют пользователя. Устройство СЕАС121 поддерживает все эти режимы. Однако, в некоторых ситуациях ощущается нехватка синхронных измерений, а «осциллографические» измерения загружают линию связи.

Специально для использования в магнитных системах ускорительных колец с быстрым циклом был разработан специальный режим синхронных измерений, так называемый «режим сопровождения файла». Дело в том, что пользователям нужна синхронизация не с абстрактным сигналом, а с циклом ускорения. Поскольку рабочий цикл магнитной системы всецело определяется цифроаналоговым преобразователем устройства, то представляется логичным синхронизировать работу измерителя от него.

С точки зрения пользователя «режим сопровождения файла» выглядит следующим образом. Существует команда включения (выключения) этого режима. Эта команда указывает номер измеряемого входного канала, интервал дискретизации и некоторые другие спецификаторы. При получении этой команды микропроцессор устройства производит нужные калибровки измерителя и подключает к АЦП входной сигнал, подлежащий контролю. После этого, с точки зрения пользователя, АЦП устройства работает автоматически и автономно. После запуска процесса («исполнения файла»), процессор начинает вычислять значения для цифроаналогового преобразователя и записывать их в ЦАП. Одновременно разрешается запоминание значений, измеренных аналого-цифровым преобразователем. Для этого отводится внутренний буфер размером 128 или 256 измерений, в зависимости от режима. Запись ведется либо до конца процесса, либо до исчерпания размера буфера. Таким образом, во внутреннем буфере измеренные значения строго синхронизированы с исполняемым файлом и, соответственно, с рабочим циклом ускорительного кольца. Если требуется прочитать значение из определенной точки временной диаграммы, управляющий компьютер запрашивает данные из соответствующего адреса буфера. Если же требуется «осциллограмма», то нужно прочитать весь (или почти весь) буфер.

Сигма-дельта преобразователи предназначаются для оцифровки постоянных или медленно меняющихся напряжений. Если входное напряжение изменяется скачкообразно на значительную величину, то первые измеренные данные имеют очень большую ошибку и считаются

недостовверными. Это подробно описано как в справочных данных на микросхемы, так и в заметках по применению [9]. Для микросхемы ADS1210, использованной в устройстве, считается, что при скачкообразном изменении входного напряжения достоверные данные будут только в третьем измерении. Однако, даже при этом производитель ничего не говорит о точности этого третьего измерения. Кроме того, некоторую погрешность может внести и качество аналогового тракта. Для проверки всего аналогового тракта было проделано несколько измерения, воспользовавшись новыми функциями устройства.

Поскольку цифроаналоговый преобразователь гарантированно обладает высокими динамическими характеристиками и может изменять сигнал синхронно с измерениями АЦП, он и использовался для генерации различных тестовых сигналов. Первый график иллюстрирует следующее измерение. Сигнал на выходе ЦАПа (и, соответственно, на входе АЦП) генерировал следующий сигнал: первые 100 мсек напряжение равно 0 В, в момент времени 100 мсек напряжение становится равным +8 В.



Рис. 6. Оцифровка ступенчатого сигнала при 20 мсек/отсчет.

Рис.6. иллюстрирует входной сигнал и измеренное значение в полном масштабе, а рис.7 показывает выход измеренного значения на полную точность. Видно, что первые два измерения (в 120 и 140 мсек) значительно отличаются от входного напряжения и только третье измерение (момент 160 мсек) обладает приемлемой точностью (лучше, чем 10^{-4}).

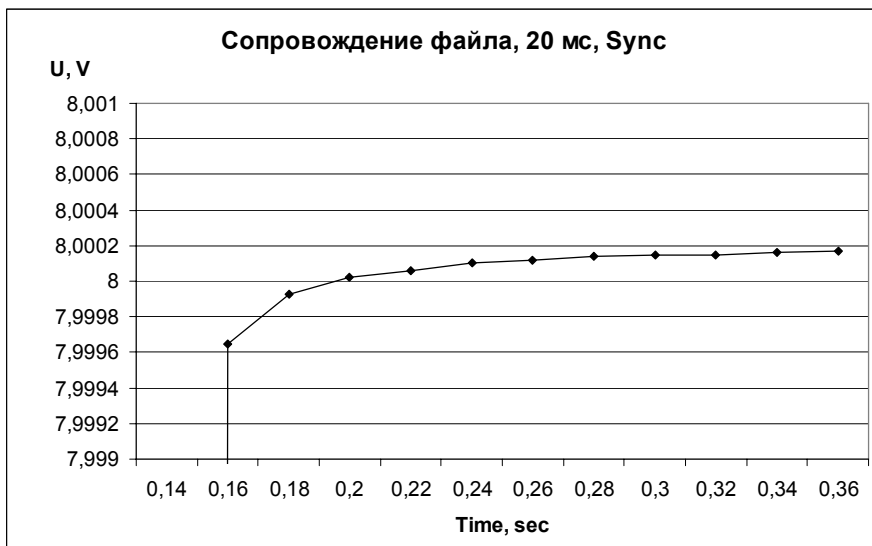


Рис. 7. Оцифровка ступенчатого сигнала при 20 мсек/отсчет («растяжка»).

Реальные сигналы в предполагаемой области применения не бывают ступенчатыми. Они представляют собой прямолинейные отрезки с различной скоростью изменения сигнала (в соответствии с алгоритмом работы цифроаналогового преобразователя, использующего метод кусочно-линейной интерполяции). Представляет интерес точность оцифровки пилообразного сигнала. Были сняты «осциллограммы» пилообразного сигнала на различных временах интегрирования аналого-цифрового преобразователя и с различной крутизной входного пилообразного сигнала. Сами «осциллограммы» не представляют какого-либо интереса. Гораздо интереснее как выглядит сигнал ошибки- разность между входным измеряемым напряжением и значениями, выдаваемыми аналого-цифровым преобразователем.

На рисунках 8 и 9 приводится разность между измеряемым сигналом и значениями АЦП при временах интегрирования 20 мсек и 2 мсек на отсчет, соответственно. Скорость изменения входного сигнала выбиралась равной 8 вольт за 100 измерений АЦП (4В/сек и 40В/сек, соответственно).

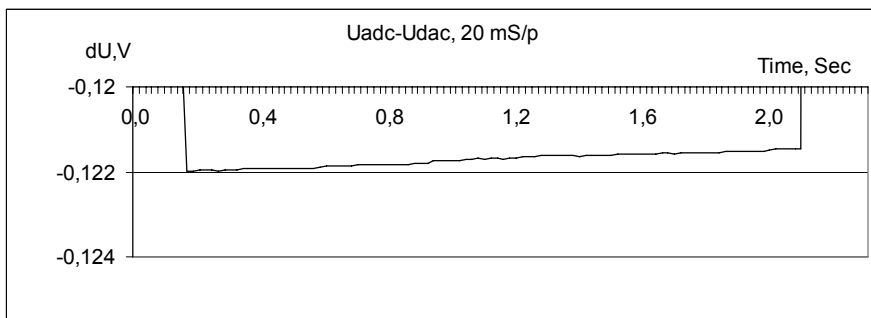


Рис. 8. Оцифровка пилообразного сигнала, 20 мсек/отсчет.

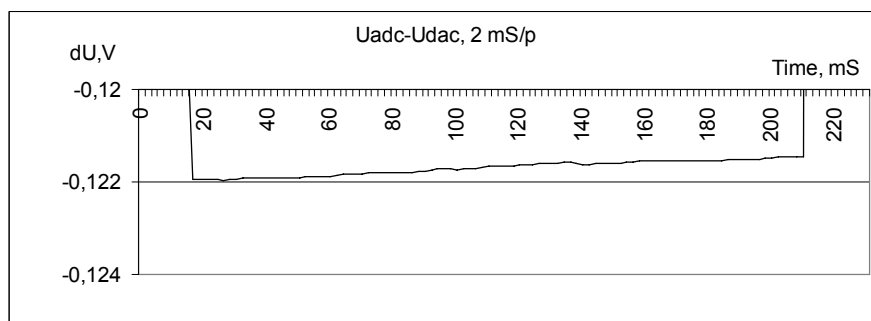


Рис. 9. Оцифровка пилообразного сигнала, 2 мсек/отсчет.

Как видно из обоих рисунков качество измерения сигнала при различных временах интегрирования практически идентично. «Ступенчатая» ошибка может трактоваться как задержка аналогового тракта.

Для лучшего понимания взаимосвязи измеряемого сигнала и данных, выдаваемых аналого-цифровым измерителем, ниже приводится еще два рисунка. В этом случае производятся измерения трапецидального сигнала. Длительность формируемого ЦАПом процесса составляет 55 мсек и включает в себя «полочку» длительностью 5 мсек. Напомним, что сигнал формируется цифроаналоговым преобразователем с дискретностью 100 мксек. Время интегрирования АЦП установлено 1 мсек/отсчет. Измеритель продемонстрировал довольно неплохие результаты. Восстановленная кривая незначительно отличается от измеряемого сигнала (рис.10).

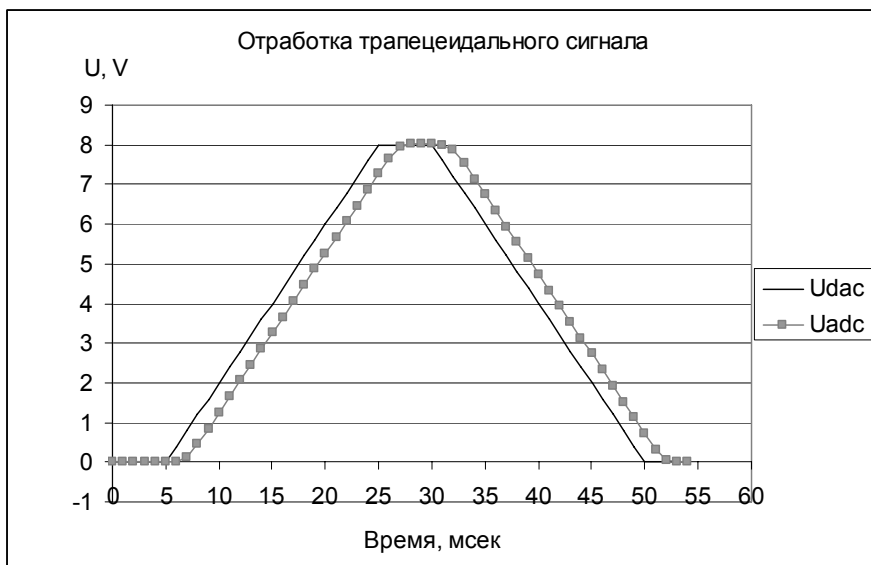


Рис. 10. Отработка трапецеидального сигнала.

Ну и, конечно, интересно увидеть разность между двумя сигналами (рис.11).



Рис. 11. Ошибка при отработке трапецеидального сигнала.

«Картинка» ошибки нуждается в некоторых дополнительных разъяснениях. Выраженные «ступеньки» могут интерпретироваться как результат задержки измерительного тракта. Однако «полочки» этих «ступенек» имеют видимый невооруженным глазом наклон. Дело в том, что если для цифроаналогового преобразователя временной квант 100 мксек можно считать идеальным (его точность и стабильность полностью определяются параметрами кварцевого генератора), то для АЦП дело обстоит несколько иначе. Для 6-ти времен интегрирования это время строго кратно временному кванту ЦАПа. Для двух времен интегрирования это сделать не удастся из-за архитектуры микросхемы АЦП. Ниже приводится таблица с точными значениями времен.

Время интегрирования	Точное время интегрирования
1 мс	1.0016 мс
2 мс	2 мс
5 мс	5.0016 мс
10 мс	10 мс
20 мс	20 мс
40 мс	40 мс
80 мс	80 мс
160 мс	160 мс

Для диапазона 1 мс/отсчет ошибка составляет 0.16%. За двадцать измерений расхождение между ЦАПом и измерителем составит уже 3%. Практически для всех приложений эта неточность времени совершенно несущественна. Однако для точных временных измерений и вычислений ее нужно учитывать.

Ну и, наконец, последний цикл измерений. Для простоты и наглядности был выбран один период синусоиды амплитудой 8 В и длительностью 100 мсек (имитация рабочего цикла бустера HITS). Можно, конечно, оцифровать идеальный синусоидальный сигнал от качественного генератора. Однако, гораздо интереснее оцифровать сигнал возможно более близкий к реальному. В реальном применении источник питания будет управляться от ЦАПа описываемого устройства. Поэтому, программа вычисляет файл, загружает его в устройство, запускает процесс исполнения файла, а АЦП обмеряет это напряжение. В данном эксперименте не применялись никакие математические хитрости, упомянутые выше и улучшающие «картинку». Синусоида формировалась из 40-ка линейных отрезков. АЦП производил синхронные измерения с временем 1 мсек на отсчет.

Сначала осциллограмма выходного напряжения ЦАПа (рис.12).

На рисунке 13 приводятся две кривые. Явная синусоида – это теоретические значения, которые эмулируются цифроаналоговым преобразователем (сжатые по вертикали). Эта кривая носит вспомогательный

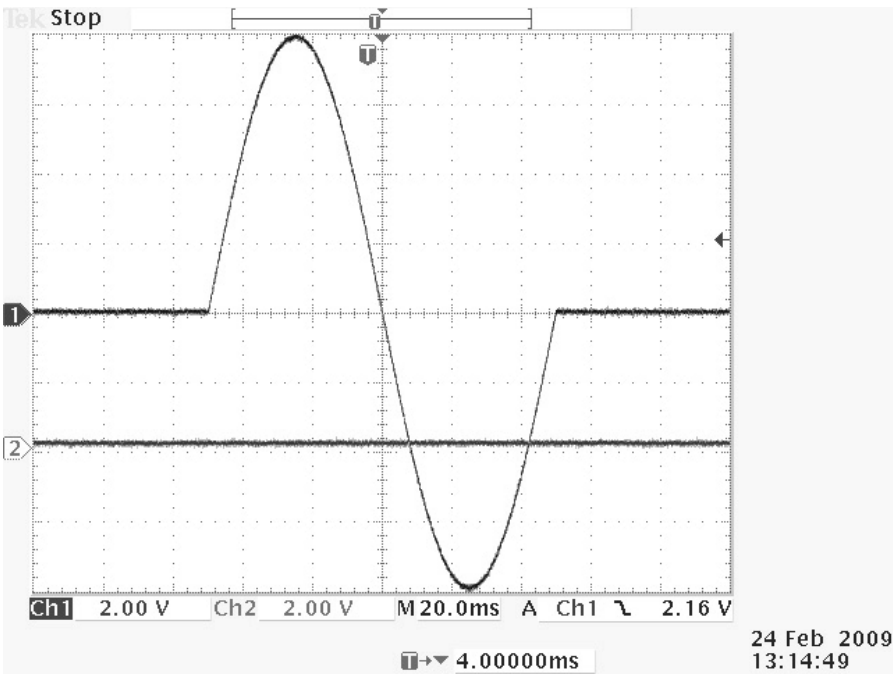


Рис. 12. Выходной сигнал ЦАП при генерации синусоидального сигнала.

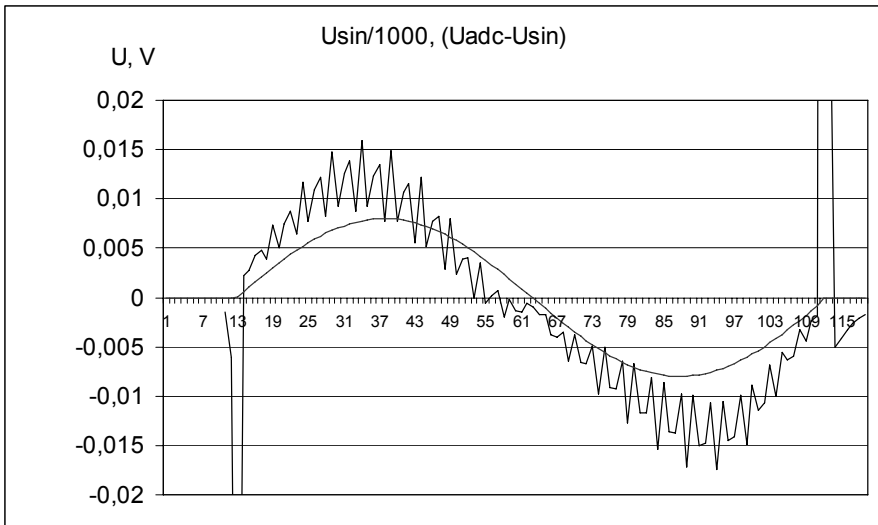


Рис. 13. Суммарная ошибка ЦАП и АЦП.

характер. Кривая ошибки вычислялась следующим образом- из фактически измеренных значений вычитались теоретические значения синусоиды из которой вычислялись задания для ЦАПа. Таким образом, кривая ошибки содержит в себе как ошибки преобразования принятым способом интерполяции, так и ошибки измерений.

Кривая ошибки содержит два явных компонента- синусоидальную составляющую величиной около 0,1% от сигнала и более мелкие «зубчики». Природа первой компоненты становится очевидной, если еще раз посмотреть на рисунки 2 и 4 и вспомнить что АЦП является интегрирующим. Во-первых, синусоида эмулируется ломаной линией, которая вписана в синусоиду. Во-вторых, эти наклонные линии, в свою очередь, эмулируются ЦАПом ступенчатым сигналом, который также вписан в эту ломаную линию. Интегрирование этого реального сигнала и приводит к ошибке масштаба. Если учесть эту погрешность масштаба, то кривая ошибки приобретет следующий вид.

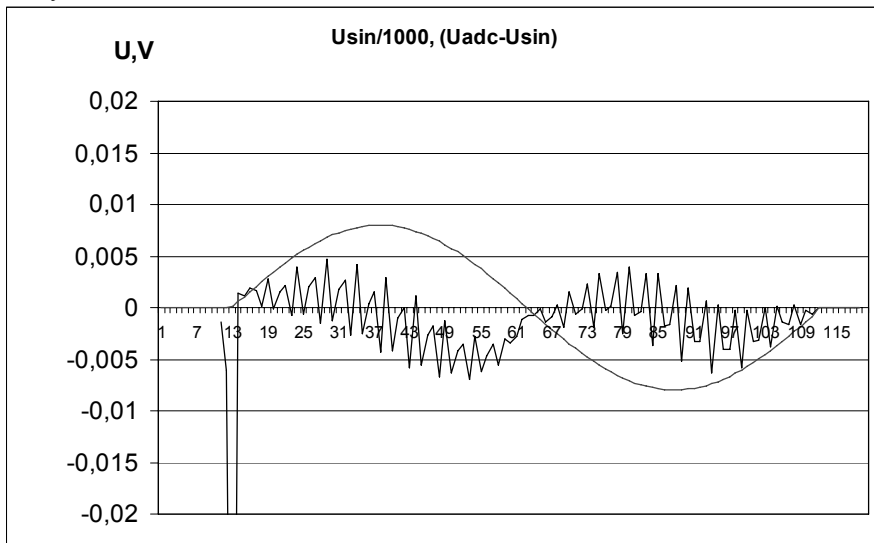


Рис. 14. Суммарная ошибка ЦАПа и АЦП с учетом погрешности масштаба.

Природу «зубчиков» также легко объяснить. Синусоида эмулируется отрезками прямых длительностью 2,5 мсек, а время интегрирования АЦП составляет 1 мсек. В зависимости от фаз этих двух периодов получается различная ошибка. Напомним, что из напряжения АЦП вычитается не реальный измеряемый сигнал, а теоретический, тот, который мы пытаемся проэмулировать отрезками прямых. Ну и, как показано в разделе 3, эти ошибки минимальны там, где синусоида наиболее линейна.

При вычислении кривых ошибки, вычиталось значение синусоиды с учетом задержки аналого-цифрового преобразователя.

5. Основные параметры устройства

В следующей таблице приводятся основные параметры аналого-цифрового преобразователя разработанных устройств.

Параметры АЦП	Значение
Диапазон измеряемых напряжений	± 10 В
Разрядность преобразователя	23 бита
Время интегрирования	1, 2, 5, 10, 20, 40, 80, 160 мсек
Шумовое разрешение (для $T_{и}=1$ мсек)	>16 бит
Шумовое разрешение (для $T_{и}=20\div 160$ мсек)	>19 бит
Абсолютная погрешность (для $T_{и}=20$ мсек)	$<0,002\%$
Абсолютная погрешность (для $T_{и}=1$ мсек)	$<0,05\%$
Смещение нуля (для $T_{и}=20$ мсек)	<30 мкВ
Температурная нестабильность масштаба	$<1,0$ ppm/ $^{\circ}$ С
Входной ток	<2 нА
Допустимая сумма синфазной помехи и дифференциального напряжения сигнала	$<10,5$ В
Подавление синфазной помехи	>75 дБ
Подавление помехи с частотой сети (для $T_{и}=20$ мсек)	>80 дБ
Длина записи в режиме «сопровождения файла», точек	256 или 128
Полоса пропускания в осциллографическом режиме для времени интегрирования 20 мсек/отсчет	
На уровне 0,7	13,1 Гц
На уровне 0,01	2,2 Гц
На уровне 0,001	0,8 Гц
Полоса пропускания в осциллографическом режиме для времени интегрирования 1 мсек/отсчет	
На уровне 0,7	262 Гц
На уровне 0,01	45 Гц
На уровне 0,001	16 Гц
Параметры ЦАПа	Значение
Выходное напряжение	± 10 В
Разрядность ЦАП	16 бит
Время установления ЦАПа на полную точность (при переключении от -10 В до +10 В)	<200 мкс
Абсолютная погрешность	$<0.03\%$
Температурная нестабильность масштаба	<10 ppm/ $^{\circ}$ С
Сопrotивление нагрузки	>10 КОм.
Размер файла	40 точек
Временной квант при исполнении файла	100 мкс

6. Заключение

Описываемое устройство проектировалось в рамках разработок источников питания по контракту с МРТИ, где рабочий цикл установки составляет 1 – 1.5 секунды, а предполагаемая форма сигналов явно трапецеидальная. Когда начались работы по проекту NITS, возник вопрос, каким быть контроллеру источников питания бустера, где рабочий цикл на порядок быстрее. Предположения о том, что устройство CEAC121 вполне подойдет для этого приложения, высказываемые коллегами, разработчику блока казались излишне смелыми. Для проверки такого варианта использования устройства был проведен ряд теоретических исследований и экспериментальных проверок. Как показано в этой работе, принципиальных препятствий для использования блока CEAC121 для управления источниками питания линз и корректоров бустера NITS нет. Потребуется только некоторые протокольные добавления для облегчения создания программного обеспечения.

Литература:

- [1] *E.N.Dementyev, V.R.Kozak, E.A.Kuper, A.S.Medvedko, A.D.Oreshkov, A.V.Ovchar, T.V.Salikova, P.A.Selivanov, S.S.Serednyakov, E.N.Shubin, S.V.Tararyshkin, N.A.Vinokurov.* The architecture and basic hardware components of FEL control system. // XX Russian Particle Accelerator Conference, 10 to 14 September, 2006, Novosibirsk, Russia.
- [2] *D.E.Berkaev, P.B.Cheblakov, V.V.Druzhinin, V.R.Kozak, I.A.Koop, E.A.Kuper, A.N.Kyrpotin, A.P.Lysenko, Yu.A.Rogovsky, Yu.M.Shatunov, P.Yu.Shatunov.* Control system of VEPP-2000 collider (software, hardware). // XX Russian Particle Accelerator Conference, 10 to 14 September, 2006, Novosibirsk, Russia.
- [3] *B.Gudkov, A.Filipchenko, V.Kozak, E.Kuper, G.Kurkin, A.Medvedko, G.Serdobintsev, S.Tararyshkin, V.Ushakov, (Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia); V.Korchuganov, Yu.Krylov, A.Valentinov, Yu.Yupinov, KCSR RSC Kurchatov Institute, N.Spinko, (LSRIPP, Zelenograd, Russia).* Revision of Zelenograd synchrotron radiation facility control system. // XX Russian Particle Accelerator Conference, 10 to 14 September, 2006, Novosibirsk, Russia.
- [4] *A. Bogomyagkov, S. Karnae, S. Mishnev, I. Nikolaev, D. Shatilov, E. Simonov, V. Smaluk.* Automation of operation of the VEPP-4 control system. // ICALEPCS-2005, 10 to 14 October, 2005, Geneva.

- [5] *S.Karnaev, E.Kuper, A.Ledenev, B.Levichev, I.Protopopov, Yo.Zaroudnev.* Control of VEPP-4M magnetic system. // ICALEPCS-1995, October 29 to November 3, 1995, Chicago, USA.
- [6] *V.Kozak.* Embedded device set for control systems. Implementation and applications. // XX Russian Particle Accelerator Conference, 10 to 14 September, 2006, Novosibirsk, Russia.
- [7] *V.Kiselev, V.Vostrikov, S.Konstantinov, G.Kurkin, E.Levichev, V.Parkhomchuk, Yu.Pupkov, V.Reva, R.Salimov, A.Semenov, S.Sinyatkin, A.Skrinsky.* Radiation therapy facility based on carbon ion cooler synchrotron. // XXI Russian Particle Accelerator Conference, September 28 – October 3, 2008, Zvenigorod, Russia.
- [8] *E.Antokhin, A. Gvozdev, G.Kulipanov, P.Logachev, N.Mezentsev, V.Panchenko, A.Philipchenko, Y.Rakshun, A.Utkin, N.Vinokurov, K.Zolotarev.* Compact hard X-ray synchrotron radiation source with superconducting bending magnets. // APAC 2007, Indore, India.
- [9] DEM-ADS1210/1211 demo board tricks to evaluate the step responses of the ADS1211 multiplexer switching. AB-111, Burr Brown.

В.Р. Козак

**Контроллер быстроперестраиваемых
источников питания с интерфейсом CANbus**

V. Kozak

**Controller for fast ramping power supplies
with CANbus interface**

ИЯФ 2009-20

Ответственный за выпуск А.В. Васильев
Работа поступила 10.07. 2009 г.

Сдано в набор 23.07. 2009 г.
Подписано в печать 18.08. 2009 г.
Формат 60x90 1/16 Объем 1.2 печ.л., 1.0 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 20

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11