

УДК 621.793.162

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНОГО КОНТРОЛЛЕРА АЦП ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ*

В.Ю. ПРОКОПЬЕВ

630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Ржанова, 2, Институт физики полупроводников СО РАН, инженер I категории. E-mail: vprok1981@mail.ru

В работе рассматривается процесс разработки четырехканального контроллера АЦП с предусилителями для синхронной регистрации оптических сигналов. Описаны особенности оптической схемы и алгоритма последующей цифровой обработки измеренных сигналов. Указаны основные аппаратные источники ошибок и несовершенства, а также методы снижения влияния данных ошибок. Рассмотрен подбор микросхем аналогового и измерительного тракта с точки зрения их индивидуальных параметров и совместной работы в схеме. Подробно рассмотрен выбор микросхемы для усилителя сигнала фотоприемника. Проведена оценка требований к источнику опорного напряжения и драйверу АЦП, проработан вопрос выбора самой микросхемы АЦП по параметрам разрядности, быстродействия и цифрового интерфейса. Для достижения большого динамического диапазона регистрируемых сигналов в модуле реализована система автоматического изменения коэффициентов усиления при частоте дискретизации АЦП 50 тыс. выборок в секунду. Достижению таких показателей способствовало применение микросхемы операционного усилителя с интегрированным цифровым переключением коэффициента усиления. Разработка проведена с использованием современных интегральных микросхем с высокими рабочими характеристиками. Подключение к персональному компьютеру и управление работой контроллера осуществляется по интерфейсу USB. Суммарное энергопотребление модуля составляет менее 1 Вт, что позволяет обеспечить питание от информационной шины.

Ключевые слова: контроллер АЦП, регистрация оптических сигналов, несовершенство оптической схемы, динамический диапазон, синхронные измерения, микросхема АЦП, источник опорного напряжения, программируемый коэффициент усиления, интерфейс USB

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на огромное количество существующих серийно выпускаемых контроллеров АЦП промышленного и лабораторного назначения, различных по конфигурации и характеристикам, специфика решаемых задач порой делает оправданным разработку собственного нового устройства.

* Статья получена 21 августа 2014 г.

Непосредственное применение контроллера АЦП, созданного в рамках настоящей работы, – регистрация оптического излучения четырьмя фотоприемниками в попарно связанных оптических каналах. Ключевыми факторами, обуславливающими проведение разработки, можно назвать следующие:

- наличие четырех каналов АЦП с одновременной регистрацией сигналов;
- динамический диапазон измеряемых сигналов до 10^7 (возможно, с переключаемым в реальном времени коэффициентом усиления);
- частота дискретизации АЦП до 500 Квыб/с при соответствующей полосе пропускания аналогового тракта и времени установления сигнала;
- связь с персональным компьютером – интерфейс USB версии 2.0.

Цель данной работы – продемонстрировать проектирование многоканального контроллера АЦП с учетом специфики его будущего применения в составе оптической схемы, а также продемонстрировать итоговые рабочие характеристики платы.

1. ОПИСАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Оптическая схема (рис. 1), в которую интегрируется контроллер АЦП, имеет на входе один общий световой пучок I_0 , который разбивается поляризационными элементами (R , P_{12} и P_{34}) на четыре оптических канала с интенсивностями сигналов I_1 , I_2 , I_3 и I_4 . Величины I_1, \dots, I_4 определяются поляризацией входного светового потока и линейно зависят от его интенсивности.

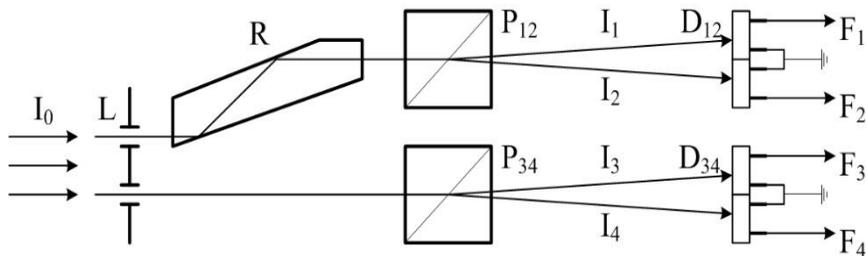


Рис. 1. Схема деления оптических сигналов на каналы:

I_0 – входящий световой поток; I_1, I_2, I_3, I_4 – разделенные световые потоки на фотоприемники; L – входная диафрагма; R – устройство пространственного смещения луча; P_{12} и P_{34} – призма Волластона для разделения на поляризационные компоненты; D_{12} и D_{34} – двухплощадные кремниевые фотоприемники ФДУК-10; F_1, F_2, F_3, F_4 – сигналы с фотоприемников

При условии достоверной регистрации абсолютных значений сигналов требуется измерить отношения $k_{12} = I_1/I_2$ и $k_{34} = I_3/I_4$ с максимальной точностью. Очевидно, что в идеале при изменении интенсивности входного излучения I_0 величины k_{12} и k_{34} должны оставаться постоянными при условии абсолютной синхронности регистрации сигналов I_1, \dots, I_4 . В то же время измерения выполняются на электрических сигналах F_1, F_2, F_3 и F_4 , которые не совсем соответствуют регистрируемым интенсивностям I_1, \dots, I_4 ввиду влияния различных погрешностей юстировки оптических трактов, особенностей работы фотоприемников и «неидентичности» измерительных каналов (т. е. $I_1/I_2 \neq F_1/F_2$ и $I_3/I_4 \neq F_3/F_4$). Для учета всей совокупности погрешностей при вычислении истинных значений k_{12} и k_{34} необходимо вводить понятия поправочных коэффициентов для каждого из четырех каналов (поправочные коэффициенты вычисляются единожды на этапе юстировки и калибровки каждого конкретного прибора).

Однако важнейшим моментом при реализации измерительной схемы является именно одновременность измерений во всех четырех каналах, которая позволит как минимум снять вопрос с дрейфом интенсивности I_0 . Для этого разумно применить четыре одноканальные микросхемы АЦП, не прибегая к схемам последовательной коммутации аналоговых каналов на один АЦП, как это часто реализуется в многоканальных контроллерах АЦП. Одновременный запуск всех четырех микросхем АЦП обеспечивает максимальную синхронность регистрации сигналов I_1, \dots, I_4 .

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ЧАСТИ

Источником электрического сигнала в схеме служит фотоприемник, включенный в фотогальваническом режиме [1]. Особенность данного включения – необходимость в предусилителе с относительно большим коэффициентом преобразования. Более того, при регистрации слабых оптических сигналов ток фотодиода может опускаться до десятка пикоампер, что накладывает серьезные требования на входные токи применяемого предусилителя. Анализ доступной элементной базы показал, что оптимальным вариантом является применение операционного усилителя AD8610B фирмы AnalogDevices [2], отличительными характеристиками которого служат:

- входные токи смещения 1,5 пА (при комнатной температуре);
- входное напряжение смещения 40 мкВ;
- время установления выходного сигнала до 0,01 % за 600 нс;
- наличие дополнительной отбраковки параметров микросхем производителем (B-grade).

Применяемые в оптической схеме прибора поляризационные элементы имеют предел чувствительности к компонентам поляризации не больше, чем 10^{-5} . Это и есть принципиальное ограничение на отношении сигналов I_1/I_2 и I_3/I_4 , или по-другому можно назвать это «относительной оптической чувствительностью». Так как в схеме предполагается измерение абсолютных величин указанных интенсивностей, то предел чувствительности самой электронной схемы должен позволять достоверно регистрировать сигнал, находящийся в своем минимуме. Для определенности выбрано, что электронная схема должна быть на два порядка более чувствительная, чем предел по «оптической относительной чувствительности». В итоге получается, что динамический диапазон регистрируемых сигналов должен быть не меньше 10^7 .

Для перехода к абсолютным величинам единиц АЦП необходимо договориться о разрядности применяемых микросхем. На момент разработки наиболее освоенными и массовыми кристаллами в сегменте скоростей преобразования до 1 Мвыб/с были АЦП с разрядностью 16 бит. Это соответствует измерению величин от 0 до 65 535 единиц. Соответственно для достижения оговоренного выше динамического диапазона необходимо в измерительном тракте предусмотреть возможность переключения коэффициента усиления в диапазоне от 1 до 1000. Это возможно благодаря применению операционных усилителей (ОУ) с программируемым (варьируемым) коэффициентом усиления (КУ) [3].

В наиболее распространенных ОУ с возможностью изменения КУ задание этого коэффициента происходит за счет подключения прецизионного резистора к соответствующим выводам микросхемы. Однако в таком случае проблематичной становится реализация переключения КУ, тем более цифровым способом: приходится использовать несколько прецизионных резисторов и мультиплексировать их к выводам ОУ. Итоговые рабочие характеристики таких устройств не очень высоки, не говоря уже о площади, занимаемой микросхемой на печатной плате.

Альтернативой служат готовые интегральные микросхемы со встроенными резисторными матрицами с лазерной подгонкой и встроенной системой коммутации этих резисторов к кристаллу ОУ. Пользователю доступны цифровые выводы с заданным интерфейсом для управления КУ. К сожалению, такие устройства не получили широкого распространения, и модели таких ОУ доступны далеко не у всех мировых производителей интегральных микросхем. В табл. 1 приведены несколько моделей ОУ с программируемым КУ, из которых, в сущности, и проводился выбор в ходе разработки. Сразу видно, что необходимое значение $KУ = 1000$ есть лишь у двух моделей: AD8253 [4] и PGA204B [5]. Последняя является достаточно старой разработкой и проигрывает микросхеме AD8253 по параметрам быстродействия и габаритам корпуса. Стоит обратить

внимание на параметр «точность выставления КУ» – значение 0,04 % для AD8253 означает отсутствие потребности калибровки измерительных каналов на фактические значения коэффициентов усиления (данная точность избыточна). Более того, для установления КУ в микросхеме AD8253 предусмотрена функция «защелки»: на выходы управления КУ выставляется цифровой код (два сигнала), соответствующий требуемому КУ, и на вывод записи КУ подается строб, который «защелкивает» КУ внутри микросхемы ОУ. Таким образом можно управлять несколькими микросхемами ОУ по единой шине, что значительно упрощает процесс проектировки печатной платы.

Таблица 1

Операционные усилители с программируемым коэффициентом усиления

| Характеристика | AD8253 AnalogDevices | PGA204B TexasInstruments | LTC6910-1 LinearTechnologies | MCP6S21 Microchip |
|---|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Коэффициенты усиления, В/В | 1, 10, 100, 1000 | 1, 10, 100, 1000 | 0, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 | 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16, 32 |
| Способ программирования КУ | Параллельная шина с защелкой | Параллельная шина | Параллельная шина | Интерфейс SPI |
| Точность установления КУ, % | 0,04 | 0,05 | 1 | 1 |
| Полоса пропускания при КУ = 1, МГц | 10 | 1 | 11 | 12 |
| Время установления выходного сигнала до 0,01 %, мкс | 14 (КУ = 1000) | 1300 (КУ = 1000) | 14 (КУ = 100) | 10 (КУ = 32) |
| Выходной шум, нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ | 10 (при КУ = 1000) | 13 | 8 | 10 |
| Диапазон напряжений питания, В | $\pm 5 \dots \pm 15$ | $\pm 4,5 \dots \pm 15$ | 2,7...10,5 (двуполярное) | 2,5...5,5 |
| Корпус | MSOP-10 | WSOIC-16 | SOT-23-8 | MSOP-8 |

В итоге выбор был сделан в пользу микросхемы AD8253: каждый из четырех измерительных каналов оснащен таким ОУ. На вход ОУ с программируемым КУ сигнал приходит с предусилителя соответствующего канала фотоприемника (сигналы UP₁, ..., UP₄).

Управление коэффициентами усиления непосредственно в ходе измерений производится путем анализа непрерывного потока измеряемых данных в каж-

дом из четырех каналов. Текущее полученное значение АЦП сравнивается с верхней и нижней константными границами: при превышении верхней границы КУ в канале уменьшается, а при смещении ниже нижней границы КУ увеличивается.

Как упоминалось выше, выбор микросхем АЦП проводился из семейства 16-разрядных. Ввиду одновременности работы с четырьмя микросхемами на достаточно медленной частоте преобразования (до 1 Мвыб/с) разумно применить АЦП с последовательным интерфейсом. В частности, интерфейс SPI предусматривает соединение устройств по цепочке (daisychain). В таком случае с точки зрения вычитывания управляющим контроллером результатов очередного измерения четыре микросхемы АЦП будут представлять единый сдвиговый регистр с 64 разрядами. Такое решение существенно экономит ресурсы управляющего контроллера (задача вычитывания данных выполняется автономным периферийным модулем SPI, встроенным в контроллер), а также упрощает проектирование печатной платы и позволяет создать более компактное устройство.

Анализ доступных микросхем АЦП показал, что наиболее подходящим вариантом является микросхема AD7686C [6] компании AnalogDevices, удовлетворяющая изложенным выше критериям. АЦП имеет в своей основе запатентованную архитектуру PulSAR (на переключаемых конденсаторах), характеризующуюся низкими шумами (SNR не более 37 мкВ) и малыми токами потребления (не более 4,3 мА при работе на частоте 500 Квыб/с).

Не менее важным вопросом при выборе микросхемы АЦП является вопрос ее внешнего оснащения, т. е. выбор драйвера АЦП, электрической схемы его подключения, а также источника опорного напряжения (ИОН).

Микросхема АЦП AD7686C не имеет встроенного ИОН. В то же время ИОН является критическим компонентом, оказывающим значительное влияние на параметры схемы сбора данных, разрешение и точность [7]. Из микросхем ИОН, рекомендуемых производителем AD7686C, стоит обратить внимание на микросхему ADR392B [8], имеющую малые габариты (корпус SOT-23-6), высокую начальную точность выходного напряжения ($4,096 \text{ В} \pm 0,012 \%$), низкий температурный дрейф (9 ppm/C), крайне низкий выходной шум (7 мкВ), хорошую нагрузочную способность (до 25 мА). Таким образом, цена минимального разряда (ЦМР) АЦП будет равняться 62,5 мкВ. Учитывая специфику применения разрабатываемого контроллера АЦП, необходимо добиться максимальной идентичности каналов для измерения пары сигналов F_1 и F_2 , а также пары сигналов F_3 и F_4 . По этой причине разумно применить одну микросхему ИОН для двух АЦП в первом и втором каналах и отдельную микросхему ИОН для двух АЦП в третьем и четвертом каналах. Потребление микро-

схемы АЦП AD7686С по входу опорного напряжения специфицируется производителем на уровне 100 мкА. Соответственно, две микросхемы АЦП совместно будут потреблять не более 200 мкА, что значительно меньше нагрузочной способности ИОН ADR392В.

Импульсные источники питания, а также цифровые микросхемы, расположенные на плате, являются источником дифференциальных шумов. Поэтому на входе каждого канала АЦП необходимо использовать помехоподавляющие низкочастотные фильтры. Для этих целей подходит RC-цепочка как фильтр первого порядка. Частота среза фильтра выбирается не слишком большой, чтобы обеспечить надежное помехоподавление, но и не слишком низкой, чтобы избежать искажения полезного сигнала. В данном случае частота оптического сигнала не превышает 1 кГц, а частота среза входного фильтра выбрана равной 5 кГц. Для этого использованы проходной резистор номиналом 300 Ом и фильтрующий конденсатор 0,1 мкФ.

В качестве драйвера АЦП (в целях экономии компонентов) удобно было бы использовать ОУ [9] с программируемым КУ AD8253, который уже выбран для расширения динамического диапазона измерительного канала. Данные ОУ полностью подходят по параметрам быстродействия, однако стоит рассмотреть его шумовые характеристики. В табл. 2 приведено сравнение собственных входных шумов АЦП AD7686С и привнесенных шумов выхода AD8253 на разных КУ. Шумовые характеристики ОУ вычислялись на основании данных по параметру «шум, приведенный ко входу $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ » с учетом текущего КУ и полосы сигнала 5 кГц (частота среза фильтра на входе АЦП). Из таблицы видно, что на всех коэффициентах усиления ОУ AD8253 обеспечивает низкую шумовую составляющую.

Таблица 2

Сравнение собственных шумов АЦП и выходных шумов ОУ AD8253

| Параметр | AD7686C | AD8253 | | | |
|---|---------|--------|---------|----------|-----------|
| | | KY = 1 | KY = 10 | KY = 100 | KY = 1000 |
| Шум, приведенный ко входу, $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ | | 45 | 12 | 11 | 10 |
| Расчетный выходной шум, мкВ (частота среза 5 кГц) | | 4 | 11 | 99 | 900 |
| Собственный входной шум, мкВ | 37 | | | | |
| Суммарный шум в единицах АЦП ($U_{\text{опоры}} = 4,096 \text{ В}$; 16 бит; ЦМР = 62,5 мкВ) | 0,6 | 0,65 | 0,8 | 2,2 | 15 |

Итоговая схема измерительного тракта представлена на рис. 2.

На схеме наглядно видна организация вычитания данных из АЦП «по цепочке»: выход данных последней микросхемы АЦП подключается ко входу данных предыдущей микросхемы. Управляющий микроконтроллер вычитывает данные из первой микросхемы АЦП. Тактовый сигнал подается одновременно на все АЦП, поэтому первая микросхема сначала выдает на выход собственные 16 бит результата измерения, а затем «пропускает» через себя данные из второго, третьего и четвертого АЦП. Таким образом, за 64 такта сигнала ADCLK1 происходит чтение данных их всех четырех АЦП.

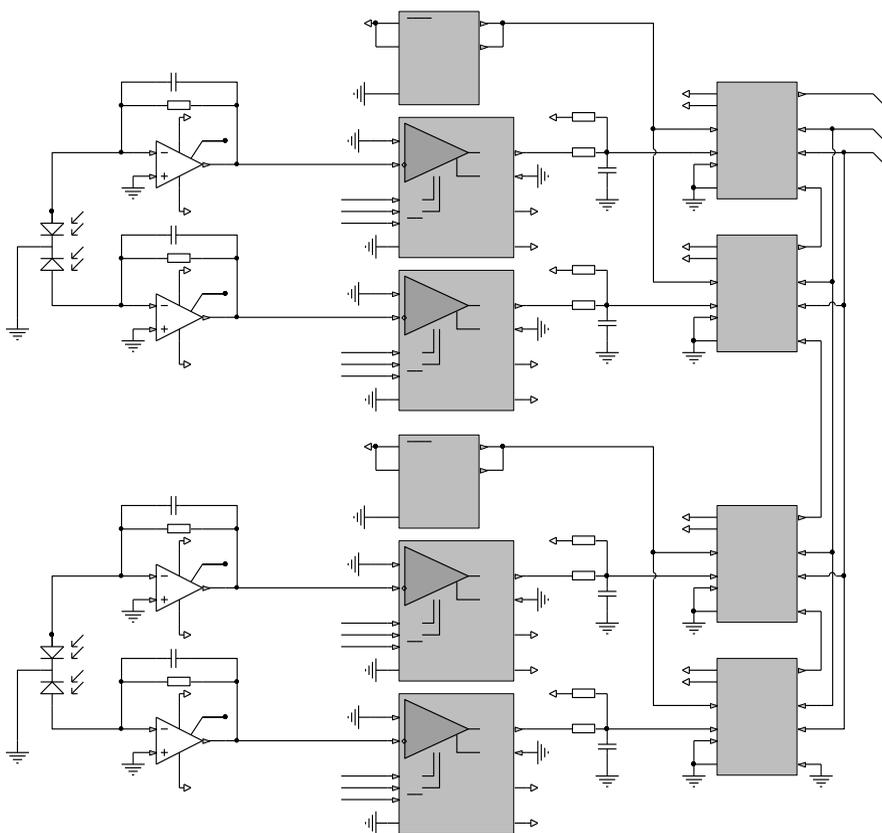


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема организации измерительных каналов контроллера АЦП (вспомогательные пассивные компоненты опущены для ясности)

Назначения сигналов:

OUT1, ..., OUT4 – выходные сигналы аналогового тракта каналов, входы АЦП;

KU1,2 – общая шина данных для выставления значения КУ;

KUW1, ..., KUW4 – сигналы выборочной установки КУ на микросхемах ОУ;

ADC_GO – сигнал одновременного запуска всех АЦП;

ADCLK1 – тактовый сигнал чтения данных из АЦП;

ADCOUT1 – общий выход данных четырех микросхем АЦП.

Чтобы обеспечить наилучшие параметры многоканальной системы сбора данных с одновременной выборкой, при разводке печатной платы были выполнены основные требования:

- использована многослойная печатная плата с отдельными слоями заземления;
- аналоговые и цифровые цепи отделены друг от друга;
- не допускалась проводка дорожек аналоговых и цифровых сигналов параллельно друг другу;
- предусмотрен один сплошной слой заземления с подводом цифровых сигналов с одной стороны и аналоговых – с другой;
- цепи аналогового и цифрового питания шунтированы на заземляющий слой керамическими конденсаторами емкостью 0,1 мкФ на каждый вывод; эти конденсаторы расположены непосредственно у выводов микросхем, чтобы минимизировать паразитную индуктивность;
- применены танталовые конденсаторы емкостью от 10 до 22 мкФ для шунтирования каждой цепи аналогового и цифрового питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный контроллер АЦП обеспечивает одновременность регистрации оптического излучения в четырех каналах на уровне единиц наносекунд. Тщательно подобранная элементная база позволила минимизировать электрические связи и сделать устройство компактным и низкопотребляющим. Индивидуальные характеристики микросхем обеспечивают динамический диапазон входного сигнала на уровне 10^7 при чувствительности порядка 60 мкА.

Описанный в настоящей работе контроллер АЦП успешно применяется в серийно выпускаемых оптических приборах [10–12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. В 2 т. = The art of electronics (© Cambridge University Press, 1980) / пер. с англ. под ред. М.В. Гальперина; пер.: И.И. Короткевич, М.Б. Левин, В.Г. Микуцкий, Л.М. Наймарк, О.А. Соболева. – Изд. 3-е, стер. – М.: Мир, 1986.

2. Analog Devices [Electronic resource: products]: AD8610: Precision, Low Input Bias Current, Wide BW JFET Single Op Amp. – URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8610_8620.pdf (accessed: 20.10.2014).

3. Analog Devices [Electronic resource: support]: MT-073: High Speed Variable Gain Amplifiers. – URL: <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-073.pdf> (accessed: 20.10.2014).

4. Analog Devices [Electronic resource: products]: AD8253: 10 MHz, G = 1, 10, 100, 1000 iCMOS: Programmable Gain Instrumentation Amplifier. – URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8253.pdf (accessed: 20.10.2014).

5. Texas Instruments [Electronic resource: products]: PGA204: Programmable Gain Instrumentation Amplifier. – URL: <http://www.ti.com/lit/gpn/pga204> (accessed: 20.10.2014).

6. Analog Devices [Electronic resource: products]: AD7685: 16-Bit, 250 kSPS PulSAR, ADC in MSOP/QFN – URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7685.pdf (accessed: 20.10.2014).

7. *Walsh A.* Voltage reference design for precision successive-approximation ADCs [Electronic resource] // Analog Dialogue. – 2013. – Vol. 47, N 6. – http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/47-06/reference_design.pdf (accessed: 20.10.2014).

8. Analog Devices [Electronic resource: products]: ADR392: 4.096 V Micro-power, Low Noise Precision Voltage Reference with Shutdown. – URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADR391_392_395.pdf (accessed: 20.10.2014).

9 *Guery A., Kitchin C.* High Speed Op Amp Drives a 16-Bit, 1-MSPS Differential-Input A/D converter [Electronic resource] // Analog Dialogue. – 2002. – Vol. 36, N 6. – http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/36-06/ADC_OpAmp/ADC_OpAmp.pdf (accessed: 20.10.2014).

10. Спектральный плазмон-эллипсометрический комплекс Эллипс-СПЭК / С.В. Рыхлицкий, В.Н. Кручинин, В.А. Швец, Е.В. Спесивцев, В.Ю. Прокопьев // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 1. – С. 137–138.

11. Спектральный эллипсометрический комплекс «ЭЛЛИПС-1891-САГ» / С.В. Рыхлицкий, Е.В. Спесивцев, В.А. Швец, В.Ю. Прокопьев // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – № 2. – С. 161–162.

12. Сканирующий эллипсометрический комплекс «МИКРОСКАН-3М» / С.В. Рыхлицкий, Е.В. Спесивцев, В.А. Швец, В.Ю. Прокопьев // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 3. – С. 155–156.

Прокопьев Виталий Юрьевич – инженер I категории Института физики полупроводников СО РАН, научный сотрудник Новосибирского государственного университета, старший преподаватель кафедры общей физики физического факультета НГУ. E-mail: vprok1981@mail.ru

Designing of the four channel ADC controller for optical radiation measurements*

V.Yu. Prokopyev

Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 2 Akademik Rzhanov Avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, engineer category 1. E-mail: vprok1981@mail.ru

A complete designing process of the four channel ADC controller for simultaneous optical radiation measurements is discussed. Optical scheme details and digital signal processing routings are described. Main sources of hardware errors and imperfections are pointed out, as well as ideas to minimize those issues. Special attention is paid to electronic parts selection assuming their individual characteristics and simultaneous operation. A detailed description of component selection for photo-detector output signal amplification is given. Requirements for voltage reference and ADC driver are evaluated. The ADC selection routing is discussed in terms of resolution, throughput and digital interface. The ADC controller implements an automatic gain adjustment to increase the total dynamic range up to 7 decades at 50 KSPS sampling rate. These characteristics result from the use of operational amplifier with integrated digital gain adjustment. The whole project was aimed to implement the most up-to-date parts. The device interfaces to personal computer via the USB 2.0. Low overall power consumption (less than 1W) allows the controller to be powered from the USB bus.

Keywords: ADC controller, optical signal detection, optical scheme imperfections, dynamic range, synchronous measurements, ADC, voltage reference, programmable gain, USB interface

REFERENCES

1. Horowitz P., Hill W. *The art of electronics*. New York, Cambridge University Press, 1980. (Russ. ed.: Khorovits P., Khill U. *Iskusstvo skhemotekhniki*. V 2 to-makh. Moscow, Mir Publ., 1986).
2. Analog Devices: products: AD8610: Precision, Low Input Bias Current, Wide BW JFET Single Op Amp. Available at: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8610_8620.pdf (accessed 20.10.2014)

* Received 21 August 2014.

3. Analog Devices: support: MT-073: High Speed Variable Gain Amplifiers. Available at: <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-073.pdf> (accessed 20.10.2014)

4. Analog Devices: products: AD8253: 10 MHz, G = 1, 10, 100, 1000 iCMOS® Programmable Gain Instrumentation Amplifier. Available at: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8253.pdf. (accessed 20.10.2014)

5. Texas Instruments: products: PGA204 Programmable Gain Instrumentation Amplifier. Available at: <http://www.ti.com/lit/gpn/pga204>. (accessed 20.10.2014)

6. Analog Devices: products: AD7685: 16-Bit, 250 kSPS PulSAR® ADC in MSOP/QFN. Available at: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7685.pdf. (accessed 20.10.2014)

7. Walsh A. Voltage reference design for precision successive-approximation ADCs. *Analog Dialogue*, 2013, vol. 47, no. 6. Available at: http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/47-06/reference_design.pdf (accessed 20.10.2014)

8. Analog Devices: products: ADR392: 4.096 V Micropower, Low Noise Precision Voltage Reference with Shutdown. Available at: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADR391_392_395.pdf, (accessed 20.10.2014)

9. Guery A., Kitchin C. High Speed Op Amp Drives a 16-Bit, 1-MSPS Differential-Input A/D Converter. *Analog Dialogue*, 2002, vol. 36, no. 6. Available at: http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/36-06/ADC_OpAmp/ADC_OpAmp.pdf (accessed 20.10.2014)

10. Rykhlytskii S.V., Kruchinin V.N., Shvets V.A., Spesivtsev E.V., Prokop'ev V.Yu. Spektral'nyi plazmon-ellipsometricheskii kompleks Ellips-SPEK [Spectral plasmon-ellipsometric setup Ellips-SPEC]. *Pribory i tekhnika eksperimenta – Instruments and Experimental Techniques*, 2013, no. 1, pp. 137–138. (In Russian)

11. Rykhlytskii S.V., Spesivtsev E.V., Shvets V.A., Prokop'ev V.Yu. Spektral'nyi ellipsometricheskii kompleks «ELLIPS-1891-SAG» [Spectral ellipsometric setup «ELLIPS-1891-SAG»]. *Pribory i tekhnika eksperimenta – Instruments and Experimental Techniques*, 2012, no. 2, pp. 161–162. (In Russian)

12. Rykhlytskii S.V., Spesivtsev E.V., Shvets V.A., Prokop'ev V.Yu. Skaniruyushchii ellipsometricheskii kompleks «MIKROSKAN-3M» [Scanning ellipsometric setup «MICROSCAN-3M»]. *Pribory i tekhnika eksperimenta – Instruments and Experimental Techniques*, 2009, no. 3, pp. 155–156. (In Russian)