

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

**ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

(институт)

Промышленная электроника

(кафедра)

11.03.04 Электроника и наноэлектроника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Промышленная электроника

(направленность (профиль))

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему **ПРЕЦИЗИОННЫЙ МОДУЛЬ АНАЛОГОВОГО ВВОДА ДЛЯ РАС-  
ПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ ADAM-4000**

Студент(ка)

Е.В. Клюстрах

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент В.А. Медведев

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент А.А. Шевцов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

Тольятти 2017

**Аннотация**

УДК 621.314.572

ББК 32 852

Бакалаврская работа Клюстрах Евгения Викторовича по теме «Прецизионный модуль аналогового ввода для распределенной системы сбора данных AD-AM-4000». Руководитель: Медведев Валерий Александрович. Защищена в Тольяттинском государственном университете в 2017 году.

Пояснительная записка: 63с., 3 разд., 37 рис., 1табл..

Графическая часть - 6 листов формата А1.

Ключевые слова: прецизионный модуль ввода аналогового сигнала, распределенная система ввода данных ADAM-4000, принципиальная схема, печатная плата, программирование микроконтроллера.

Бакалаврская работа посвящена разработке прецизионного модуля аналогового ввода для распределенной системы сбора данных ADAM-4000. В ходе проектирования устройства разработана структурная схема, дано обоснование выбора элементной базы, разработаны принципиальная схема и печатная плата модуля. Выбраны средства программирования и отладки микроконтроллера.

## Содержание

Введение.....	5
1 Аналитическая часть. Исследование принципов построения и технических характеристик прецизионных модулей ввода аналоговых сигналов .....	6
1.1 Анализ входных аналоговых сигналов модулей ввода .....	6
1.2 Анализ структурных схем систем сбора данных .....	7
1.3 Управляющие микроконтроллеры систем сбора данных .....	10
1.3.1 Средства разработки и отладки программного обеспечения .....	10
1.3.2 Технические характеристики МК семейства MSP430.....	12
1.4 Основные технические параметры АЦП .....	13
1.5 Распределенная система сбора данных ADAM-4000 .....	16
1.5.1 Общая характеристика модулей семейства ADAM-4000 .....	16
1.5.2 Анализ технических характеристик модулей ADAM-40xx .....	17
1.6 Распределенная система сбора данных и управления серии NL.....	18
1.7 Анализ проблем согласования MSP430 с цифровыми периферийными устройствами.....	22
2 Расчетная часть. Проектирование модуля аналогового ввода для ADAM-400025	
2.1 Выбор управляющего микроконтроллера модуля ввода .....	25
2.2 Выбор аналого-цифрового преобразователя .....	28
2.3 Анализ и выбор компонентов аналоговых интерфейсных схем .....	30
2.3.1 Входные преобразователи входных сигналов .....	31
2.3.2 Выходные преобразователи входных сигналов .....	37
2.3.3 Выбор интерфейсных схем модуля ввода.....	38
2.4 Обоснование выбора элементной базы модуля ввода.....	39
2.4.1 Обоснование выбора источника опорного напряжения.....	39
2.4.2 Обоснование выбора оптопар гальванической развязки .....	39
2.4.3 Обоснование выбора интерфейса управления ЖК индикатором .....	41
2.5 Организация интерфейса RS-485.....	42
2.6 Расчет надежности модуля аналогового ввода .....	45

3 Конструкторская часть. Технологическое обеспечение разработки модуля ввода .....	48
3.1 Проектирование печатной платы интерфейсного модуля .....	48
3.2 Программирование флэш-памяти микроконтроллеров MSP430F14x .....	51
3.2.1 Структура и функционирование флэш-памяти .....	53
3.2.2 Программирование устройств MSP430 с флэш-памятью .....	56
3.3 Средства отладки и программирования микроконтроллера MSP430.....	57
3.4 Среда программирования IAR для разработки ПО модуля ввода .....	58
Заключение .....	60
Список литературы .....	62

## Введение

Стремительные темпы компьютеризации всех сторон человеческой деятельности привели к тому, что сегодня вычислительная техника стала неизменным атрибутом самых различных технических комплексов. Это касается и современных систем управления и сбора данных, контрольно-измерительного и лабораторного оборудования, т.е. любых комплексов, основной задачей которых является обработка и интерполяция информации, поступающей из «внешнего мира».

Преимущества обработки информации и осуществления функций управления с использованием цифровых методов являются вполне очевидными. Однако данные, которые поступают из внешнего мира, обычно представлены в аналоговой форме. Необходимый аналого-цифровой интерфейс обеспечивает системы сбора данных (ССД). Они преобразуют исходные данные от внешних устройств (например, датчиков) в цифровой код, пригодный для цифровой обработки. Диапазон применения ССД необыкновенно обширен - начиная от простого текущего контроля значений одной аналоговой переменной и кончая контролем и управлением сотней параметров в ядерных агрегатах, современных летательных аппаратах и т.п.

Перед разработчиками весьма часто встает задача согласования параметров периферийных устройств, воспринимающих информацию из внешнего мира, с параметрами модулей ввода аналоговых сигналов с систему сбора данных.

Трудности реализации интерфейсных схем, состоят в том, что периферийные устройства, как правило, имеют выходные сигналы разного уровня и различной природы (напряжение, ток, частота и т.п.). Аналогичная задача решается в случае разного напряжения питания управляющего контроллера и его периферийных устройств.

Поэтому задача разработки недорогих унифицированных модулей ввода данных с высокими эксплуатационно-техническими характеристиками для систем сбора данных является весьма актуальной.

## **1 Аналитическая часть. Исследование принципов построения и технических характеристик прецизионных модулей ввода аналоговых сигналов**

Разрабатываемый прецизионный модуль аналогового ввода предназначен для использования в распределенной системе сбора данных (ССД) семейства ADAM-4000 компании Advantech. Эта серия является одной из наиболее функционально насыщенных и используется для построения простых систем сбора данных с использованием интерфейса RS-485.

Для определения путей решения задачи необходимо сначала оценить принципы построения и основные параметры модулей ввода данных и особенности аналоговых сигналов, поступающих на их входы, используемые интерфейсы передачи данных и, конечно, особенности ССД ADAM-4000.

### **1.1 Анализ входных аналоговых сигналов модулей ввода**

К аналоговой периферии систем сбора данных в большинстве случаев относят датчики различного рода физических величин. Простейшим типом аналоговых датчиков являются некомпенсированные датчики. В состав этих недорогих базовых датчиках входит только чувствительный элемент (сенсор). Простота и низкая цена некомпенсированных датчиков приводят к тому, что на плечи потребителей ложится обеспечение целого ряда задач по нормализации выходного сигнала, которые обычно берет на себя разработчик датчика.

Существенно облегчить задачу могут датчики с температурной компенсацией и калибровкой. Эти приборы включают в себя кроме сенсора, встроенные в кристалл резисторы и термисторы, калиброванные с помощью лазерной подгонки с тем, чтобы выдать относительно стабильный выходной сигнал при любой температуре. Такие параметры, как смещение при нулевом уровне внешних воздействий и диапазон, калибруются при изготовлении, чтобы обеспечить незначительный разброс параметров от прибора к прибору.

Наиболее «законченными» являются датчики со стандартным выходным сигналом, максимально облегчающие задачу пользователя. Эти датчики содержат кроме сенсора и встроенных в кристалл элементов температурной компен-

сации и калибровки, схему усилителя для увеличения выходного сигнала до стандартной величины в 4,5 В или 5 В при нулевом значении измеряемого параметра.

Датчики со стандартным выходным сигналом конечно несколько дороже компенсированных, но они требуют минимальных усилий от пользователя и в наибольшей степени приближаются к идеальным датчикам. Такие датчики наиболее эффективны для разработки небольших ССД, предназначенных для единичного или мелкосерийного производства.

В случае использования сигналов с не стандартизованными значениями в ССД должен присутствовать модуль нормализации, обеспечивающий преобразование входного сигнала в напряжение постоянного тока с динамическим диапазоном, соответствующим динамическому диапазону используемого АЦП.

Учитывая вышесказанное, в дальнейшем будем ориентироваться именно на уровни входного напряжения, соответствующие стандартному (унифицированному) уровню.

## **1.2 Анализ структурных схем систем сбора данных**

Система сбора данных (ССД) – это набор аппаратных средств, осуществляющий выборку, преобразование, хранение и первоначальную обработку различных входных аналоговых сигналов. Система сбора данных является основным элементом многоканальных средств измерений, определяющим его технические характеристики.

В состав ССД могут входить фильтры нижних частот (ФНЧ), нормирующие усилители (НУ), аналоговый мультиплексор (MUX), устройство выборки и хранения (УВХ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и микроконтроллер (МК). Некоторые типы ССД содержат программируемый усилитель после мультиплексора, что позволяет перестраивать диапазон измерений.

На рисунке 1.1 показана структурная схема одноканальной системы сбора данных. Сигнал, попадающий от измерительного преобразователя ИП (датчика), как правило, незначителен по амплитуде, к нему примешаны нежелательные сигналы и шумы, и, кроме того, может возникнуть необходимость в его линейри-

зации.

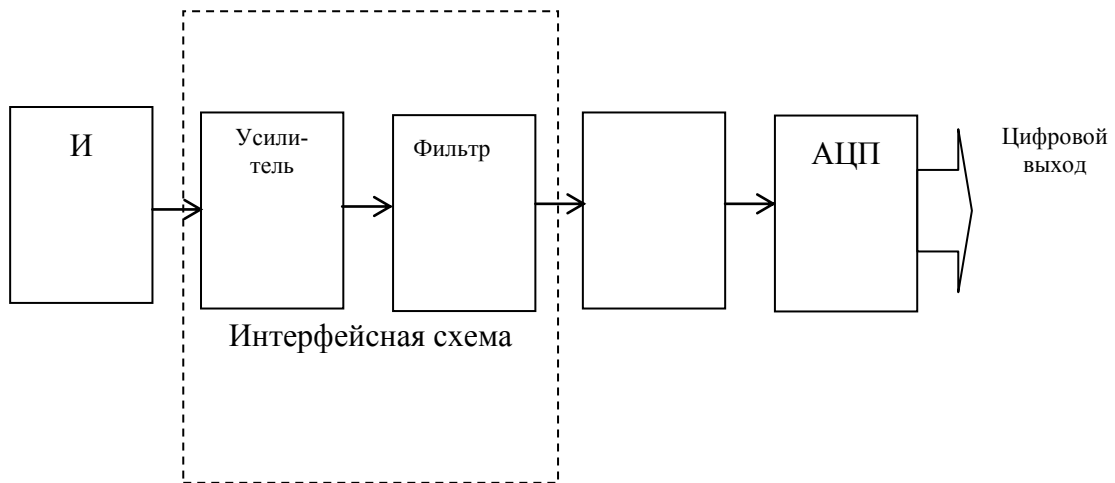


Рисунок 1.1 – Структурная схема одноканальной системы сбора данных.

Для формирования сигнала с оптимальными характеристиками с целью дальнейшей обработки используется помощь интерфейсная схема, содержащая усилители, фильтры и прочие аналоговые схемы.

Существуют два основных подхода к обработке нескольких аналоговых сигналов:

- а) аналоговое мультиплексирование всех входных каналов с использованием одного АЦП для выполнения преобразований;
- б) использование отдельных АЦП для каждого канала.

На рисунке 1.2 показана типовая структурная схема системы сбора данных в которой осуществлено аналоговое мультиплексирование каналов.

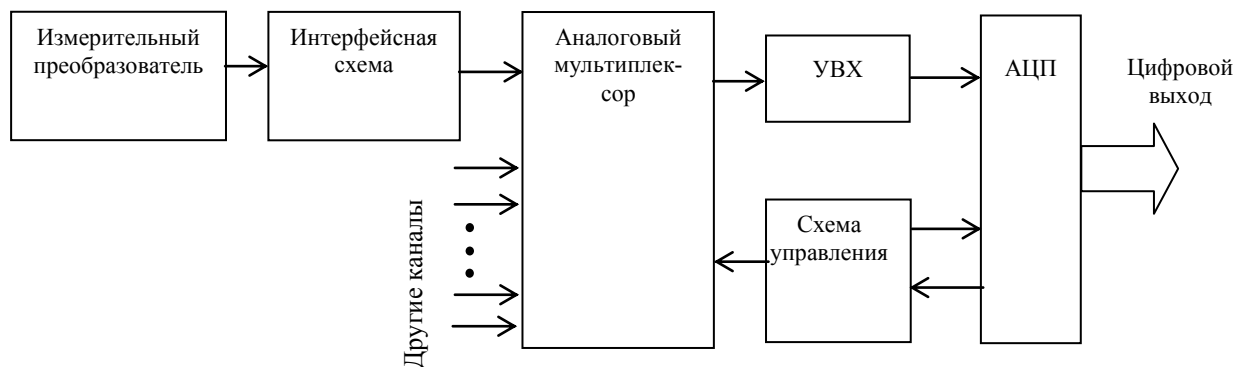


Рисунок 1.2 – Структурная схема многоканальной системы сбора данных с применением аналогового мультиплексирования.

По команде мультиплексор соединяет выбранный канал в устройство выборки/хранения (УВХ), которое осуществляет выборку и потом хранит ее для



преобразования в АЦП.

УВХ дает возможность мультиплексору по необходимости переключиться на другой канал, в то время как АЦП еще выполняет преобразование. Это значит, что время переключения мультиплексора и его время установления не влияют на производительность системы.

При параллельном способе сбора данных для каждого канала применяется свой АЦП (рисунок 1.3).

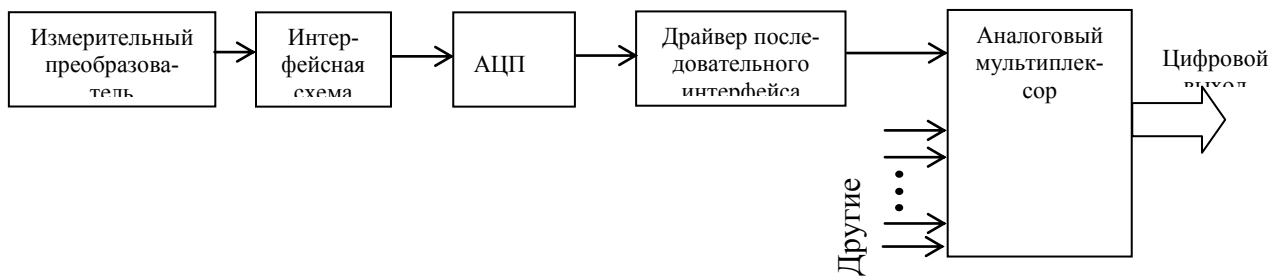


Рисунок 1.3 – Структурная схема многоканальной системы сбора данных с применением цифрового мультиплексирования.

Преимущества такого подхода проявляются в промышленных системах сбора данных, когда измерительные преобразователи распределены по большой площади и, как правило, работают в условиях сильных внешних помех. Установка АЦП вблизи измерительных преобразователей и передача преобразованных данных в цифровой форме предотвращают прохождение аналоговых сигналов через области действия помех.

В настоящее время существуют два основных подхода к проектированию современных систем сбора данных: построение ССД с использованием дискретных компонентов и построение ССД с использованием технологий систем на кристалле.

Первый подход является наиболее сложным способом разработки ССД. Он требует обоснованного выбора элементной базы, схемотехнических решений и конструкции печатной платы. Этот подход предполагает создание макетного образца и проведение испытаний, что увеличивает сроки и стоимость разработки. Для всего перечисленного необходимы высокая квалификация разработчика, а также достаточно большие временные и экономические затраты. Тем не менее,

построение ССД на дискретных компонентах необходимо для решения узкоспециализированных задач. Это целесообразно в случаях, когда для решения задачи не существует специализированных систем на кристалле или готовых интегральных ССД.

Компания Maxim выпускает значительное количество высокоинтегрированных компонентов с уникальными характеристиками для построения современных ССД. В номенклатуре, выпускаемой ею продукции есть компоненты для реализации любого узла ССД, такие как датчики физических величин, интегральные фильтры, операционные и инструментальные усилители, цифровые и аналоговые мультиплексоры, устройства выборки и хранения, источники опорного напряжения, программируемые усилители, аналого-цифровые преобразователи, микроконтроллеры и т.д.

Наличие отдельного АЦП для каждого канала позволяет реализовать намного большую частоту дискретизации в расчете на канал.

### **1.3 Управляющие микроконтроллеры систем сбора данных**

В настоящее время при разработке практически любой аппаратуры вопросы, связанные с обеспечением минимального энергопотребления, становятся одними из наиболее важных. Многие производители предлагают целые семейства микроконтроллеров со сверхнизким энергопотреблением, но выбор наилучшего решения более сложен, чем простое просматривание и сравнение первой страницы технического описания. Для выбора наиболее оптимального с точки зрения потребления решения необходимо очень подробно сравнить характеристики микроконтроллеров во всех режимах работы (включая режимы пониженного потребления), рассмотреть способы синхронизации, характеристики обработки событий, встроенные периферийные устройства, наличие функции обнаружения и защиты от кратковременного пропадания напряжения питания, величину тока утечки и эффективность вычислительного ядра.

#### **1.3.1 Средства разработки и отладки программного обеспечения**

Несомненным достоинством микроконтроллеров семейства MSP430 можно считать чрезвычайно простую в освоении систему команд с малым числом

инструкций. Предоставляемые пользователю средства разработки программного обеспечения позволяют работать как в классическом ассемблерном коде, так и на языках высокого уровня (Си, Паскаль, Форт).

Основные средства отладки и настройки программ и электронных схем представлены на рисунке 1.4.

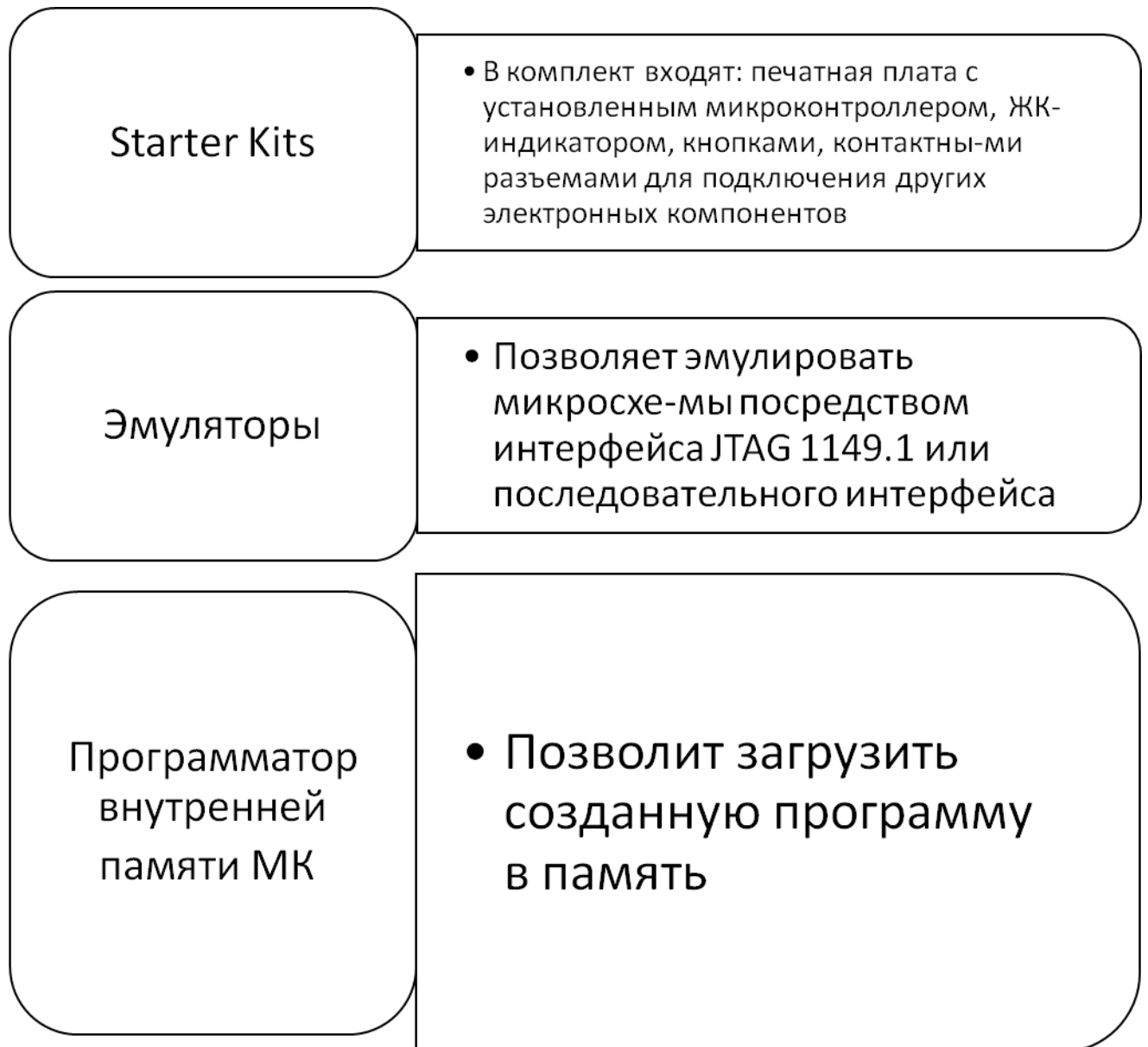


Рисунок 1.4 - Основные средства отладки и настройки программ и электронных схем.

В состав микроконтроллеров семейства MSP430 входят собственные интерфейсы программирования JTAG, BSL и последовательный интерфейс, с помощью которых и может быть запрограммирована внутренняя память. Применение в микроконтроллерах флэш-памяти позволяет отлаживать прикладные про-

граммы непосредственно в готовой схеме.

### **1.3.2 Технические характеристики МК семейства MSP430**

Следуя обозначившейся в настоящее время тенденции применения в микроконтроллерах модулей flash-памяти, заменяющих традиционные ПЗУ (масочные, однократно или многократно программируемые), фирма Texas Instruments выпускает так называемые флэш-микроконтроллеры (с индексом F) - устройства с flash-памятью. Достоинства этой технологии очевидны - возможность многократного перепрограммирования непосредственно в схеме устройства, возможность накопления и обновления данных непосредственно из прикладной программы.

Разрабатываемый модуль ввода данных должен быть реализован на микроконтроллере именно такого типа. Поэтому при дальнейшем рассмотрении МК со сверхнизким энергопотреблением будем ориентироваться именно на устройства серии MSP430Fxxx.

Приведем краткий перечень основных характеристик микроконтроллеров MSP430Fxxx, имеющих значение для реализации поставленной задачи:

- а) 16-разрядная RISC-архитектура, обеспечивающая большинства команд за один машинный цикл;
- б) тактовая рабочая частота до 8 МГц;
- в) напряжение питания от 1,8 до 3,6 В;
- г) потребляемый ток от 160 до 280 мкА при частоте 1 МГц;
- д) пять режимов экономии энергии;
- е) возможность внутрисистемного программирования через последовательный интерфейс;
- ж) встроенный супервизор напряжения питания;
- з) весьма широкий набор интегрированной периферии (АЦП, драйверы ЖКИ, модули последовательных интерфейсов UART, SPI, I2C);
- и) от 14 до 48 линий ввода\вывода;
- к) диапазон рабочих температур от -40 до +85 °С.

Основные преимущества реализации модуля ввода на основе микро-

контроллера MSP430Fxxx:

а) сверхмалая потребляемая мощность и наличие пяти режимов экономии энергии обеспечивают минимальные затраты на техническое обслуживание;

б) высокая производительность 16 разрядного RISC-ядра и быстрый выход из дежурных режимов позволяют еще больше снизить энергопотребление за счет увеличения времени нахождения микроконтроллера в состояниях ожидания, когда периферия продолжает работать, а переход в активный режим осуществляется только по готовности данных для обработки результатов;

в) широкий набор интегрированной периферии и большое количество линий ввода-вывода общего назначения обеспечивают высокие функциональные возможности устройства.

#### **1.4 Основные технические параметры АЦП**

Статические параметры АЦП приведены на рисунке 1.5.

Возникновение динамических погрешностей связано с дискретизацией сигналов, изменяющихся во времени. Можно выделить следующие параметры АЦП, определяющие его динамическую точность (рисунок 1.6).

В идеале повторяющиеся преобразования фиксированного постоянного входного сигнала должны давать один и тот же выходной код. Но присутствие неизбежного шума в схемах АЦП создает некоторый диапазон выходных кодов для заданного входного напряжения.

Для характеристики шума применяется термин «эффективная разрешающая способность», или эффективная разрядность (ENOB). Как правило, ENOB применяется для обозначения динамической эффективности высокоскоростных АЦП при преобразовании ими сигналов переменного тока и гораздо реже в отношении низкочастотных сигма-дельта АЦП.

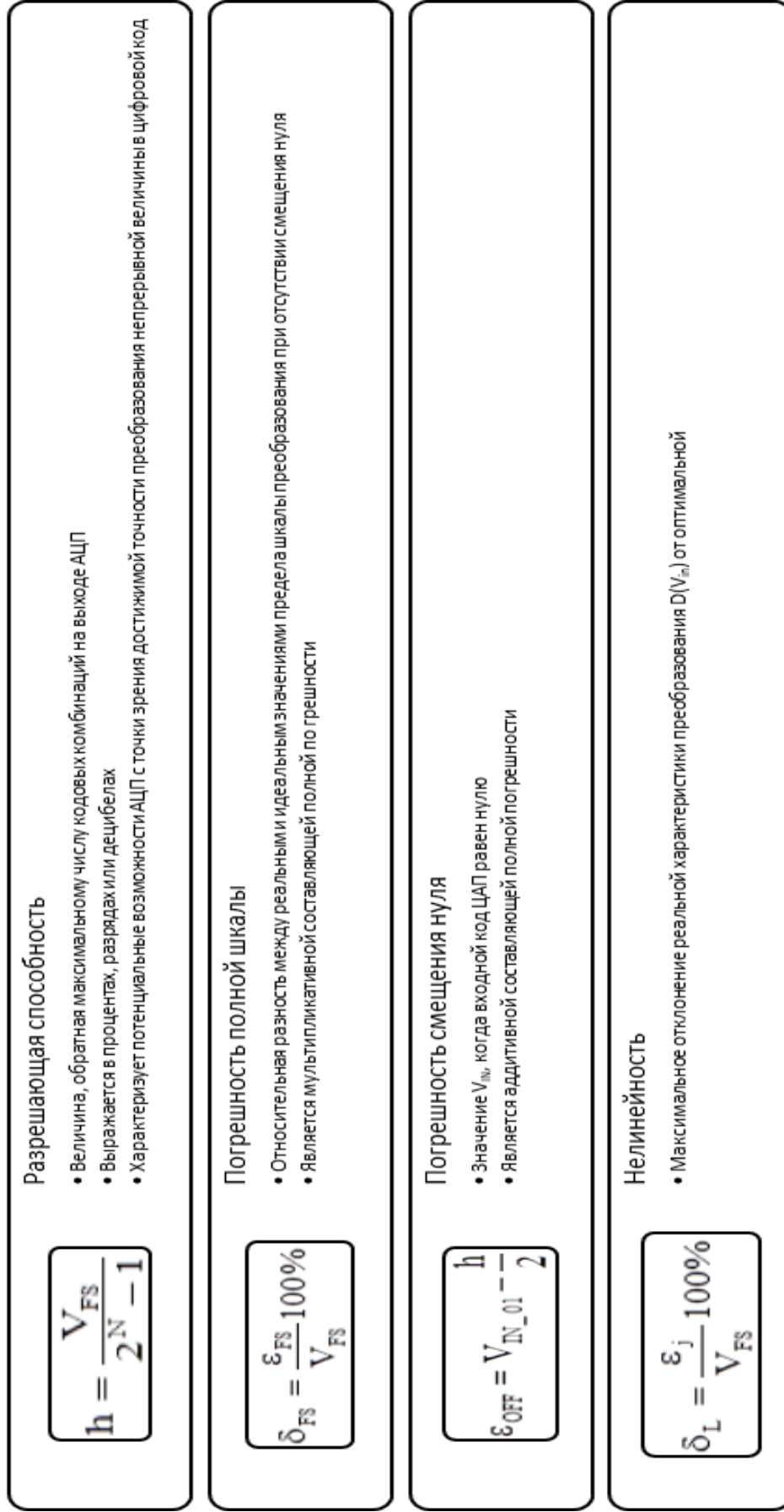


Рисунок 1.5 – Статические параметры АЦП.

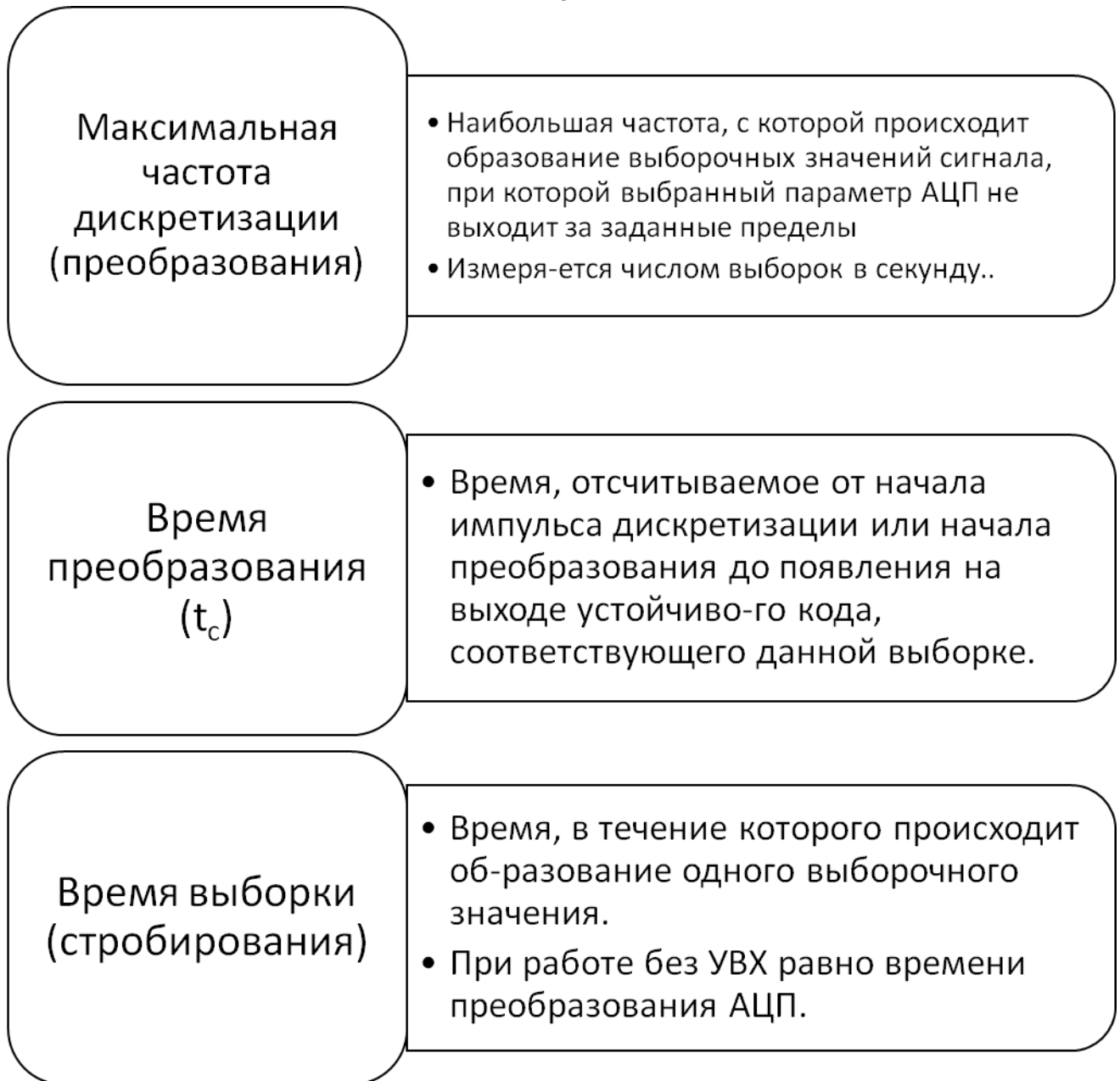


Рисунок 1.6 – Динамические параметры АЦП.

Эффективная разрешающая способность высокоскоростных АЦП определяется уравнением (1.1):

$$\text{ENOB} = \log_2 \left( \frac{V_{\text{FS}}}{V_{\text{N}}} \right) \text{ бит}, \quad (1.1)$$

где:  $V_{\text{FS}}$  - входное напряжение полной шкалы АЦП;

$V_{\text{N}}$  - среднеквадратическое отклонение шума.

Эффективная разрешающая способность АЦП высокой разрядности может быть много ниже номинальной.

Рассмотренные параметры АЦП являются наиболее используемыми и до-

статочно полно характеризуют АЦП при работе с относительно медленно изменяющимися сигналами (как в случае высокоточных измерениях веса).

## 1.5 Распределенная система сбора данных ADAM-4000

### 1.5.1 Общая характеристика модулей семейства ADAM-4000

Модули серии ADAM-4000 разработаны для создания распределенных систем сбора данных и управления и являются компактными и интеллектуальными устройствами обработки сигналов датчиков, специально разработанными для применения в промышленности.

Присутствие встроенных микропроцессоров дает возможность модулям осуществлять нормализацию сигналов, операции аналогового и дискретного ввода-вывода, отображение данных и их передачу (или прием) по интерфейсу RS-485. Все модули обладают гальванической развязкой по цепям питания и интерфейса RS-485, программной установкой параметров, командным протоколом ASCII и сторожевым таймером. Структура системы сбора данных на модулях ADAM-4000 приведена на рисунке 1.7.

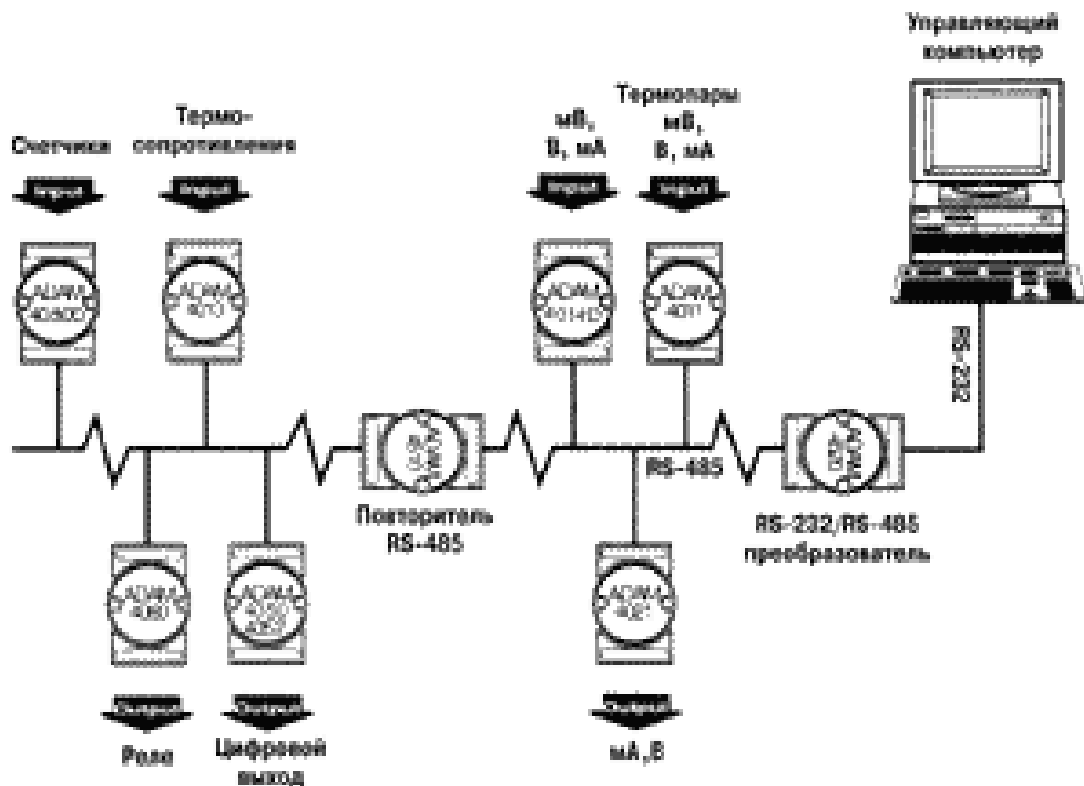


Рисунок 1.7 - Структура системы сбора данных на модулях ADAM-4000. Контроллеры и модули данной серии используются для построения рас-



пределенных систем сбора данных и управления. Встроенные микропроцессоры позволяют осуществлять нормализацию сигналов, операции аналогового и дискретного ввода-вывода, отображение данных и их передачу (или прием) по интерфейсу RS-485. Все модули имеют гальваническую развязку по цепям питания и интерфейса RS-485, программную установку параметров, командный протокол ASCII и сторожевой таймер.

### **1.5.2 Анализ технических характеристик модулей ADAM-40xx**

Микропроцессорные модули аналогового и дискретного ввода-вывода ADAM-40xx производства компании Advantech предназначены для использования в интеллектуальной распределенной системе сбора данных ADAM-4000.

Модули обеспечивают аналого-цифровое преобразование входных сигналов датчиков в виде напряжения постоянного тока. Наличие встроенных микроконтроллеров позволяет им осуществлять нормализацию сигналов, операции аналогового и дискретного ввода-вывода, отображение данных и их передачу (прием) по интерфейсу RS-485. Все модули имеют гальваническую развязку по цепи питания и интерфейса RS-485, программную установку параметров, командный протокол ASCII и сторожевой таймер.

Наиболее близкими к разрабатываемому устройству являются модули аналогового ввода ADAM-401x, обеспечивающие 16 разрядное аналого-цифровое преобразование с поддержкой гальванически развязанного интерфейса RS-485. Максимальное количество модулей в сети 256, скорость передачи данных может быть выбрана программно в диапазоне от 1200 до 115200 бит\с Внешний вид модулей показан на рисунке 1.8.

Модули предназначены для монтажа на DIN-рейку, имеют напряжение питания от 10 до 30 В при потребляемой мощности до 1 Вт. Диапазон рабочих температур ADAM-401x от минус 10 до плюс 70°C.

Проведенный обзор Интернет-сайтов различных дистрибьюторов показал, что на рынке РФ присутствует более 20 модулей ввода-вывода аналоговых сигналов семейства ADAM-4000.



Рисунок 1.8 - Внешний вид модулей семейства ADAM-401х.

Модули семейства ADAM-40хх стандартизованы, отличаются высокой надежностью, способностью работать в широком диапазоне изменений параметров окружающей среды и питающих напряжений. Однако относительно высокая цена модулей делает невозможным их использование для низкобюджетных проектов. Так, например, цена модуля аналогового ввода ADAM-4018 на 8 каналов составляет 176\$, а такого же модуля ADAM-4018+ с поддержкой протокола ModBus – 246\$.

### **1.6 Распределенная система сбора данных и управления серии NL**

Отечественными аналогами модулей семейства ADAM-40хх и, естественно, полностью с ними совместимыми, являются модули ввода-вывода аналоговых сигналов распределенной системы данных и управления серии NL научно-исследовательской лаборатории автоматизации и проектирования (г. Таганрог) совместно с ЗАО «Спектрон» (г. Тольятти). Эти модули выпускаются согласно ТУ 4252-002-24171143-03 [11,12].

Модули серии NL являются интеллектуальными (микропроцессорными) компонентами распределенной ССД. Эти модули реализуют следующие функции:

- а) аналого-цифровое преобразование;
- б) цифро-аналоговое преобразование;
- в) ввод-вывод дискретных сигналов;
- г) счет импульсов;

- д) измерение частоты преобразования;
- е) преобразование интерфейсов.

Данные модули применяются при построении эффективных систем управления производственными процессами, которые будут использоваться в жестких эксплуатационных условиях.

Модули могут соединяться между собой, а также с управляющим компьютером или контроллером при помощи промышленной сети посредством последовательных интерфейсов (RS-232, RS-485). Управление модулями реализуется с помощью набора команд в ASCII кодах. Все модули имеют режим программной калибровки и могут быть использованы в качестве средств измерений.

У модулей нет механических переключателей. Все настройки выполняются программно с помощью управляющего компьютера (контроллера). Программно можно установить следующие параметры:

- а) диапазон измерения;
- б) формат данных;
- в) адрес модуля;
- г) скорость обмена;
- д) наличие бита контрольной суммы;
- е) параметры калибровки.

Эти параметры записываются в ЭП ПЗУ и сохраняются при выключении питания. Некоторые модули имеют светодиодный или жидкокристаллический дисплей (рисунок 1.9), это дает возможность контроля технологических параметров прямо в месте установки модуля, а не на управляющем компьютере.

Все модули содержат сторожевых таймера, первый - супервизор перезапускает модуль в случае его «зависания» или провалов напряжения питания, второй - watch dog переводит выходы модуля в безопасные состояния при «зависании» управляющего компьютера.

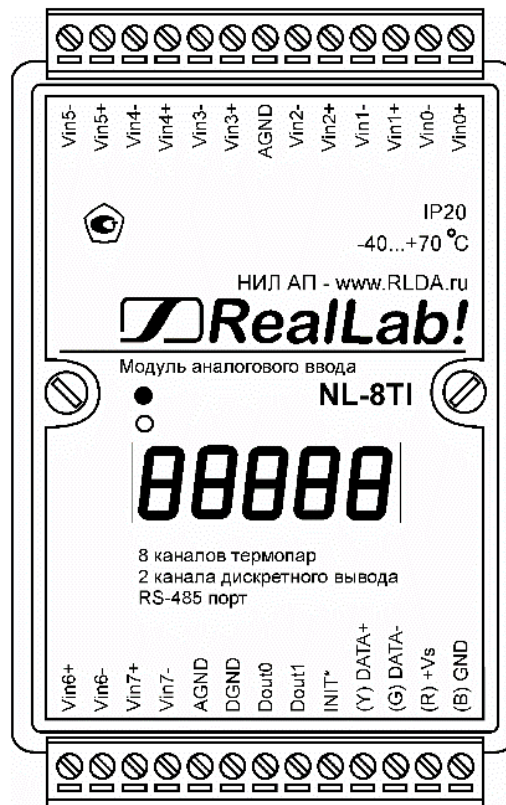


Рисунок 1.9 – Внешний вид модуля NL-8TI.

Набор команд модулей содержит 20-50 разнообразных команд, которые передаются в стандартных ASCII кодах. Это позволяет программировать их с помощью практически любого языка программирования высокого уровня. Модули выполнены с целью применения в жестких условиях эксплуатации (температура окружающего воздуха - 40 до +70°C). Они имеют гальваническую изоляцию с испытательным напряжением изоляции 2,5 кВ (ГОСТ 12997-84).

Основные достоинства модулей NL состоят в том, что они полностью соответствуют стандартам РФ, имеют низкое энергопотребление, обеспечивают функции ввода-вывода, что позволяет использовать их в качестве локальных технологических контроллеров. Усиление модулей регулируется программно в широких пределах, обеспечивая работу с различными периферийными устройствами. Техническая поддержка модулей выполняется на русском языке.

Модули серии NL могут объединяться в сеть на основе последовательных интерфейсов RS-xxx, в которой могут быть использованы одновременно и модули других производителей (ADAM, ICP, NuDAM и другие).

В состав серии NL входят следующие основные модули: NLcon-IAT - программируемый логический контроллер, модули ввода-вывода (4, 8 и 16 аналоговых и цифровых каналов), NL-2С - модуль счетчика-частотомера, конвертеры и повторители (ретрансляторы) интерфейсов и другие.

Модули имеют дифференциальные входы, к которым могут подключаться любые источники аналоговых сигналов напряжения или тока. В качестве примера на рисунке 1.10 приведена структурная схема модуля NL-8TI.

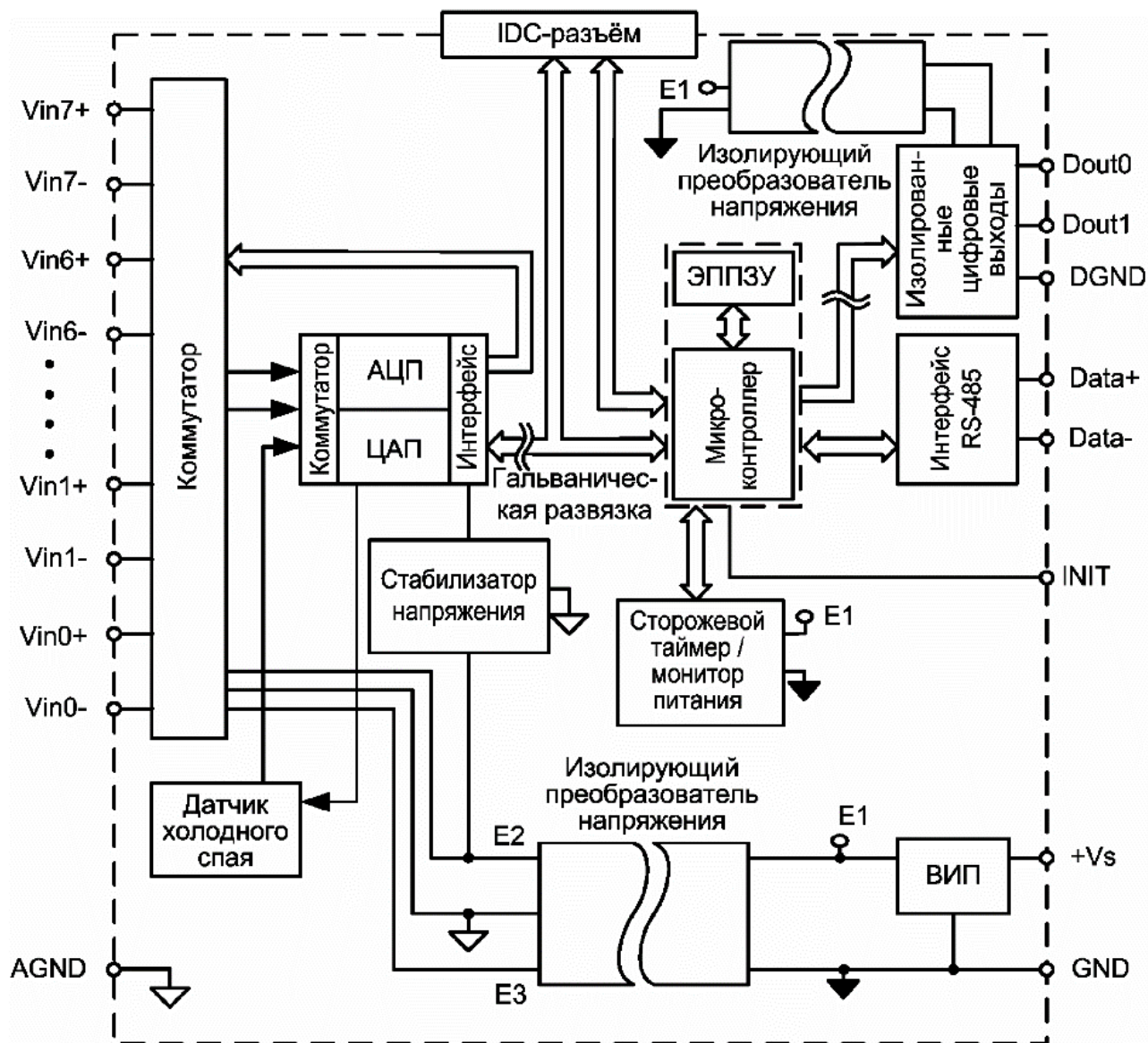


Рисунок 1.10 – Структурная схема модуля NL-8TI.

Сигналы с входа модуля подаются на вход АЦП посредством аналогового коммутатора (мультиплексора) и преобразуются в цифровой код. У АЦП есть встроенный цифровой фильтр и усилитель с цифруправляемым коэффициентом

усиления. Это позволяет программно изменять полосу пропускания модуля и диапазон входных напряжений. Число разрядов АЦП уменьшается при увеличении усиления. Поэтому при работе с различными периферийными устройствами коэффициент усиления может быть подобран индивидуально.

Цифровой сигнал с выхода АЦП через модули гальванической развязки поступает в микроконтроллер и далее - на выход модуля NL-8TI. Тем самым обеспечивается полная гальваническая изоляция входов от блока питания и интерфейсной части.

Управляющий микроконтроллер модуля выполняет следующие функции:

- а) осуществляет команды, идущие из управляющего компьютера;
- б) выполняет обработку сигналов с периферийных устройств (компенсация нелинейности, калибровка и прочее);
- в) реализует протокол обмена через требуемый интерфейс RS-485.

Интерфейс RS-485 реализован на стандартных микросхемах фирмы Analog Devices. Эти микросхемы удовлетворяют стандартам EIA для интерфейсов RS-485 и RS-422 и имеют защиту от электростатических зарядов, от выбросов на линии связи, короткого замыкания и перенапряжения. Дополнительно в модуле использована позисторная защита от перенапряжения на клеммах порта RS-485. Аналогичная защита использована для входа источника питания.

### **1.7 Анализ проблем согласования MSP430 с цифровыми периферийными устройствами**

Основными элементами цифровой периферии, с которыми приходится согласовывать управляющие микроконтроллеры систем сбора данных, являются интегральные микросхемы ТТЛ и КМОП, цифровые жидкокристаллические и светодиодные индикаторы, цифровые резисторы и прочие радиокомпоненты. Согласование с этими компонентами в общем случае может быть на логическом уровне (формирование управляющих сигналов в соответствующем формате), по току (обеспечение необходимого тока нагрузки) и по напряжению (согласование входных и выходных уровней). В зависимости от типа периферийных устройств может потребоваться один или несколько видов согласования. В ряде случаев

для обеспечения требуемого уровня выходного тока требуются буферные усилители тока.

Интерфейсный модуль должен обеспечивать двунаправленный 8 разрядный интерфейс обмена данными и управление цифровой периферией, реализованной на ТТЛ и КМОП интегральных микросхемах с различными уровнями питающих напряжений.

Области допустимых уровней сигналов на входах и выходах MSP430, ТТЛ и КМОП интегральных микросхем приведены на рисунке 1.11.

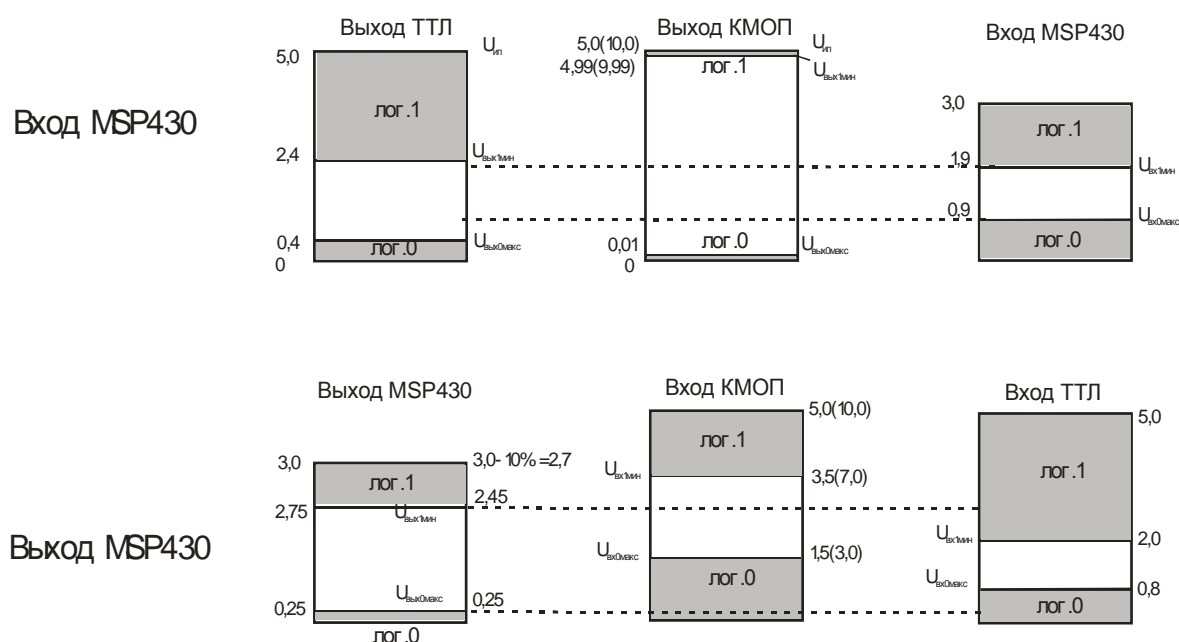


Рисунок 1.11- Области допустимых уровней сигналов на входах и выходах MSP430 и периферийных устройств.

Согласование с ТТЛ периферией в зависимости от напряжения питания, а также нагрузки или источника сигнала может быть либо по току или напряжению, либо по току и напряжению одновременно. При управлении ТТЛ периферией согласование по напряжению выполняется автоматически.

Необходимость согласования по напряжению при приеме сигналов следует непосредственно из диаграммы допустимых уровней напряжения на входах и выходах ИС (рисунок 1.10). Необходимость согласования по току возникает в основном при управлении несколькими входами ТТЛ микросхем.

При работе с КМОП периферийными модулями в виду крайне небольших входных токов этих микросхем согласование по току обеспечивается автомати-

чески, хотя для повышения быстродействия может быть полезным использование источника сигнала с увеличенным значением выходного тока.

В то же время согласование по напряжению может потребоваться даже при весьма близких уровнях напряжения питания ТТЛ и MSP430. Это видно из рисунка 1.10, где минимальный выходной уровень MSP430 в состоянии логической единицы 2,45 В меньше минимально допустимого уровня в состоянии логической единицы на входе КМОП ИС, равного 3,5 В.

Из проведенного анализа следует, что в ряде случаев непосредственное управление цифровыми периферийными устройствами с помощью MSP430 невозможно, так имеется значительное несовпадение предельно допустимых уровней логических сигналов «0» и «1». Следовательно, работа с различной цифровой периферией с помощью микроконтроллера MSP430 без интерфейсных согласующих элементов невозможна.



## **2 Расчетная часть. Проектирование модуля аналогового ввода для ADAM-4000**

Как показал проведенный в аналитической части обзор, в современных системах сбора данных все чаще используются управляющие микроконтроллеры со сверхнизким энергопотреблением семейства MSP430 фирмы Texas Instruments. Эти микроконтроллеры работают при уровне питающих напряжений от 1,8 до 3,6 В, что обусловлено используемым технологическим процессом и обеспечивает ряд существенных преимуществ перед микроконтроллерами других производителей.

При работе таких низковольтных МК с аналоговой и цифровой периферией, имеющей в общем случае различные уровни питающего напряжения, возникают определенные трудности по согласованию уровней входных и выходных сигналов. Решение этой проблемы возможно только при использовании специальных интерфейсных схем.

### **2.1 Выбор управляющего микроконтроллера модуля ввода**

Анализ состава семейства MSP430Fxxx показал, что в составе базовой (наиболее дешевой) версии кристалла имеют все требуемые модули для решения поставленной задачи микроконтроллеры подсемейства MSP430F14x. Эти МК обладают следующими отличительными особенностями (рисунок 2.1).

Внутренняя архитектура микроконтроллеров семейства MSP430F14x показана на рисунке 2.2.

Сравнительные характеристики флэш микроконтроллеров подсемейства MSP430F14x приведены на рисунке 2.3.

Проанализировав рисунок 2.3 можно сделать вывод, о применении микроконтроллера MSP430F149, который имеет два модуля USART и относительно большой объем (60 кБ) встроенной flash-памяти.

Интегрированный в МК MSP430F149 аналого-цифровой преобразователь не обладает достаточной точностью и, кроме того, его использование не обеспечивает требуемой степени гальванической развязки входных цепей модуля.

## Отличительные особенности микроконтроллеров семейства MSP430F14x

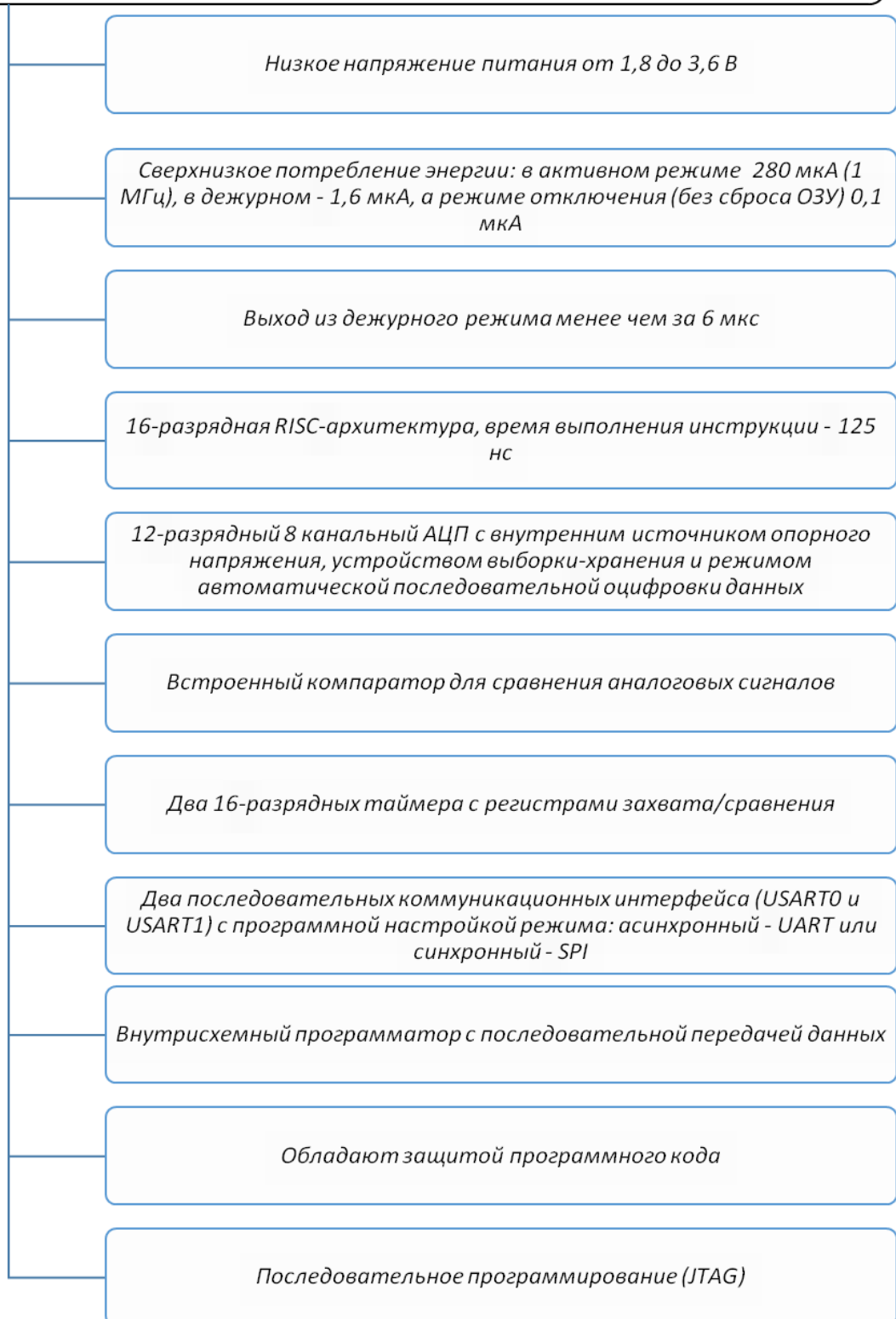


Рисунок 2.1 - Микроконтроллеры семейства MSP430F14x. Отличительные особенности.

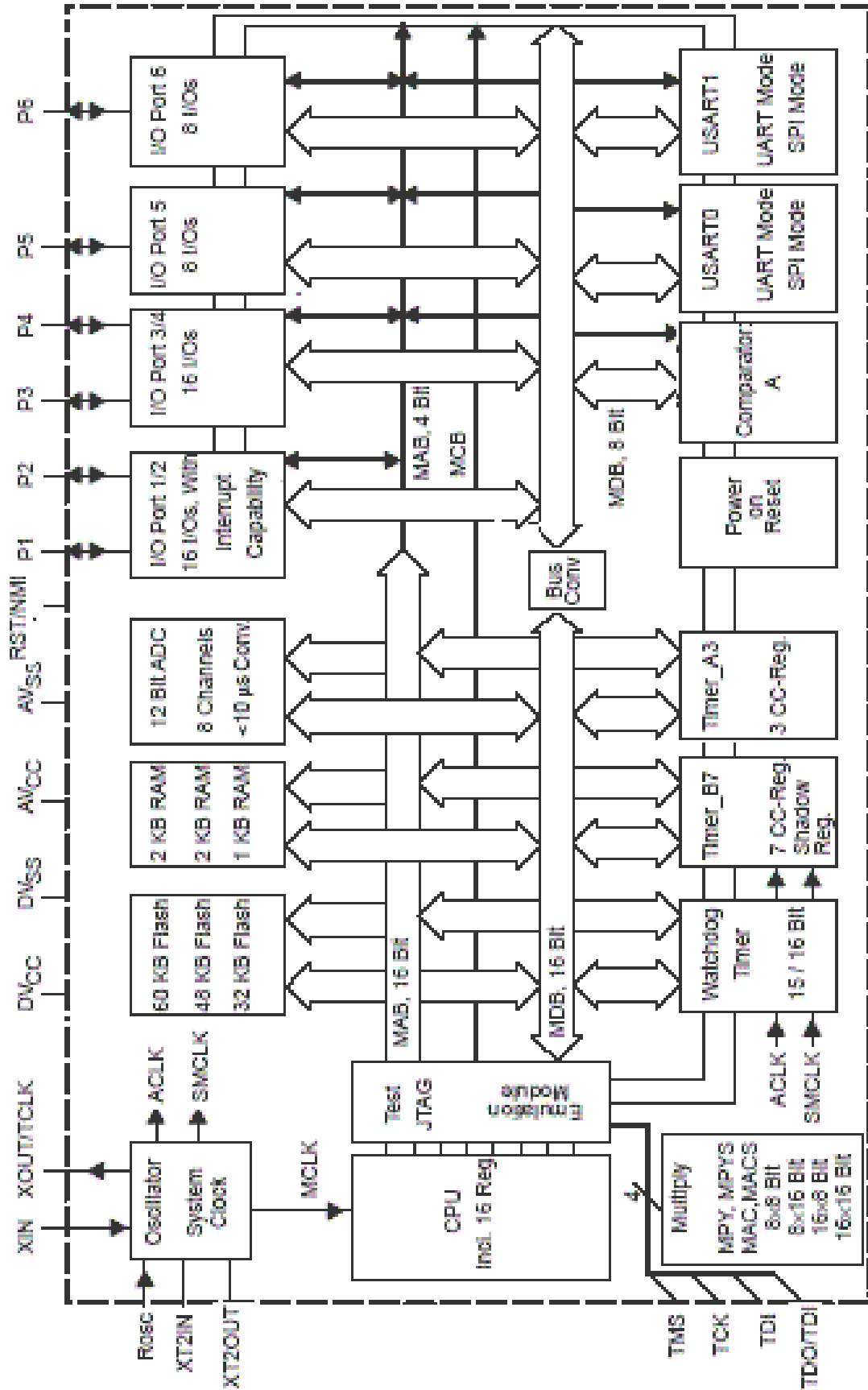


Рисунок 2.2 – Внутренняя архитектура микроконтроллеров семейства MSP430F14x.

Параметры	MSP430F147	MSP430F148	MSP430F149
Flash-память	32к+256	48к+256	60к+256
RAM	1024	2048	2048
АЦП	12 bit	12 bit	12 bit
Линии ввода\вывода	32	32	32
Драйвер ЖКИ	нет	нет	нет
Захват / Сравнение + Таймер	Да	Да	Да
Модуль USART	2	2	2
Встроенный умножитель	Есть	Есть	Есть
Количество таймеров	3	3	3

Рисунок 2.3 - Сравнительные характеристики флэш микроконтроллеров подсемейства MSP430F14x.

## 2.2 Выбор аналого-цифрового преобразователя

В разделе 1.4 были приведены основные параметры АЦП, на основании анализа которых следует выбирать конкретную модель АЦП, обеспечивающую выполнение требований технического задания. При этом следует помнить, что параметры АЦП, как правило, являются определяющими для эксплуатационных

и метрологических параметров конечного изделия.

На рисунке 2.4 приведена структурная схема АЦП ADS8331\2 компании Texas Instruments с истинной 16-разрядной точностью без пропуска кодов.

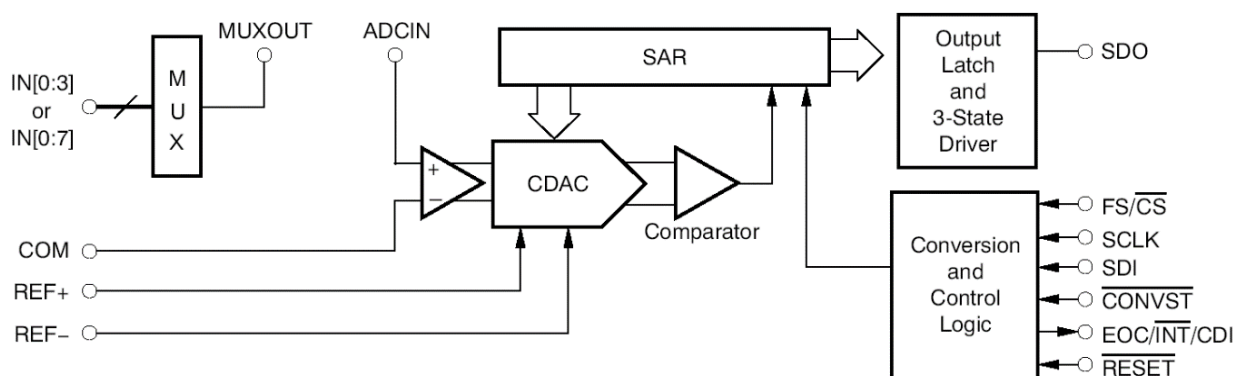


Рисунок 2.4 - Структурная схема АЦП ADS8331\2.

Эти прецизионные АЦП могут измерять входные напряжения в диапазоне от 0 до 2,5 В с разрешением 16 бит (0,0015%) и производительностью 500 тысяч измерений в секунду (500 kSPS). Обмен данными с управляющим (host) контроллером осуществляется по стандартному последовательному интерфейсу.

Основные достоинства АЦП ADS8331\2:

а) превосходные характеристики по соотношению сигнал-шум (SNR) 91,5 дБ и динамическом диапазоне 101 дБ обеспечивают высокую точность и дискретность в применениях для систем сбора данных;

б) широкий диапазон напряжений источника питания - от 2,7 до 5,5 В (аналоговые) и от 1,65 до 5,5 В (цифровые), делает возможным их использование в портативных приложениях и упрощает сопряжение с низковольтными микропроцессорами;

в) использование интегрированных мультиплексоров (4:1 или 8:1) позволяет сэкономить до 50 % площади монтажной платы и по сравнению с дискретной реализацией;

г) совместимость по выводам четырехканальных и восьмиканальных устройств позволяет разработчикам добиваться высокой точности при разных температурах и в различных многоканальных конфигурациях конечных приложений.

В настоящее время преобразователи ADS8331 и ADS8332 поставляются в 24-контактных корпусах QFN размером 4×4 мм, а также в 24-контактных корпусах TSSOP (PW). Цена при заказе партии 1000 штук составляет 5,50 долларов США (ADS8331) и 6,50 долларов США (ADS8332).

Стандартная схема подключения АЦП ADS8331\2 приведена на рисунке 2.5.

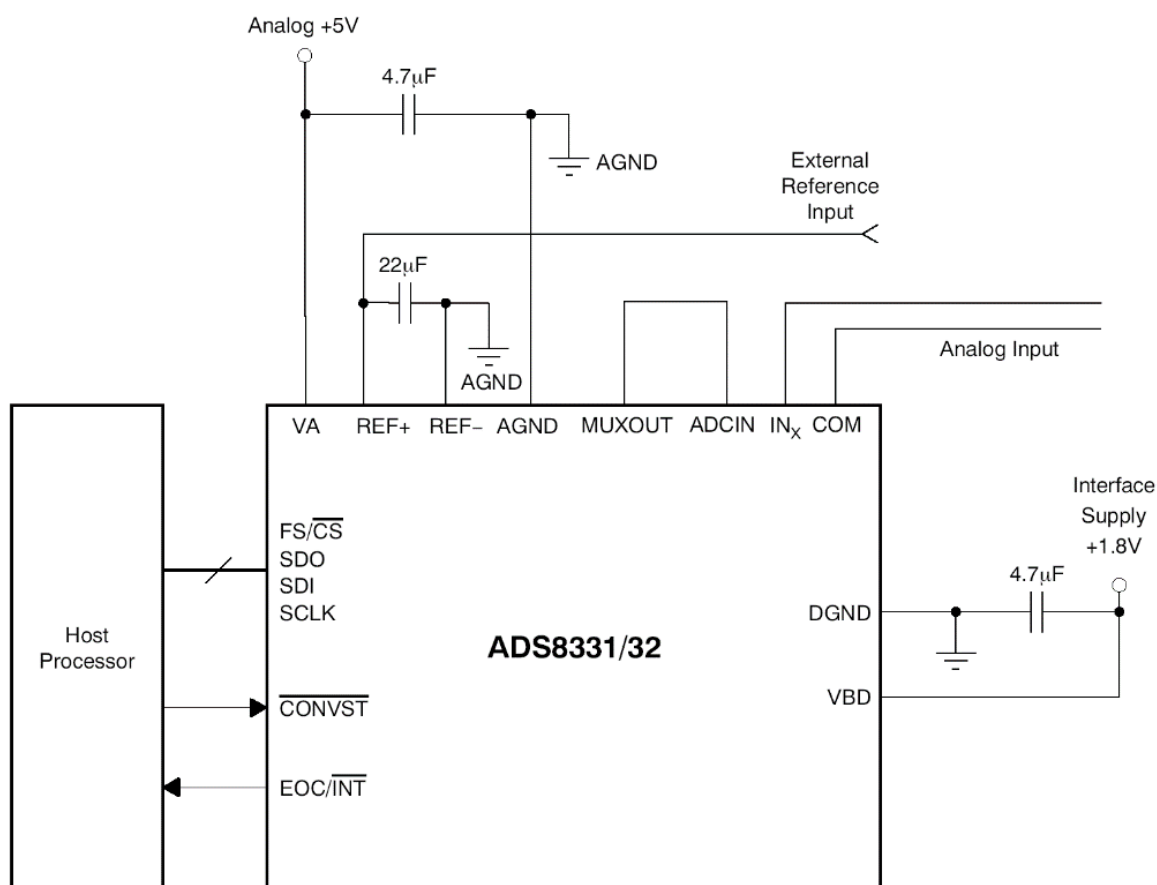


Рисунок 2.5 - Стандартная схема подключения АЦП ADS8331\2.

### 2.3 Анализ и выбор компонентов аналоговых интерфейсных схем

При разработке вариантов интерфейсных схем будем учитывать наилучшие из возможных сочетаний влияющих факторов. В этом случае можно будет гарантировать работоспособность разработанных схем для большинства известных применений распределенной системы сбора данных и управления серии ADAM-4000.

Численные значения значений параметров (наихудший вариант) взяты из технической спецификации на микроконтроллер MSP430F149 и приведены на рисунке 2.6. В большинстве случаев эти значения соответствуют номинальному

напряжению питания цифровой части  $DV_{cc} = 3 \text{ В}$ . В случаях другого значения  $DV_{cc}$  в тексте будут даны соответствующие комментарии.

Отметим, что выходное сопротивление  $r_{DS(on)}$  выходов MSP430F149 во внимание принимать не будем ввиду выбора при расчётах высокоомных внешних резисторов. В этом случае по сравнению с ними выходное сопротивление  $r_{DS(on)}$  (не более 167 Ом) пренебрежительно мало.

Далее при расчетах будем использовать следующие обозначения:

- а) - напряжение питания внешней системы  $V_{(sys)}$ ;
- б) - выходное напряжение логической «1» внешней системы  $V_{(sysH)}$ ;
- в) - выходное напряжение логического «0» внешней системы  $V_{(sysL)}$ ;
- г) - входное напряжение логической «1» внешней системы  $V_{(sys+)}$ ;
- д) - начальный разброс интерфейсных резисторов  $r$ .

При расчетах будем учитывать, что минимальное напряжение питания  $DV_{CC(min)}$  для MSP430 при  $DV_{CC} = 3,0 \text{ В} \pm 10\%$  составит  $3,0 \text{ В} \times 0,9 = 2,7 \text{ В}$ .

### **2.3.1 Входные преобразователи входных сигналов**

Данные входные преобразователи, как уже указывалось выше, рассчитаны на согласование MSP430 с аналоговой и цифровой периферией с напряжением питания 5 В. Их также можно применять и при более высоких значениях напряжения питания периферии, например, для согласования входа микроконтроллера MSP430 с 12-вольтовыми сигналами.

Наиболее простым решением проблемы является использование входных преобразователей на резистивных делителях. Схема такого преобразователя приведена на рисунке 2.7

	Минимальный уровень питания цифровой части	
$DV_{CC(min)}$		1,8 В
	Максимальный уровень питания цифровой части	
$DV_{CC(max)}$		3,6 В
	Максимальный порог уровня лог. «1» на входе порта	
$V_{IT(max)}$		1,9 В
	Минимальный порог уровня лог. «0» на входе порт	
$V_{IT(min)}$		0,9 В
	Минимальное напряжение лог. «1» на выходе порта при $I/O = -1,5$ мА	
$V_{ON(min)}$		$DV_{CC} - 0,25$ В
	Максимальное напряжение лог. «0» на выходе порта при $I/O = 1,5$ мА	
$V_{OL(max)}$		$DV_{SS} + 0,25$ В
	Ток утечки по входу	
$I_{ikg}$		$\pm 50$ нА
	Абсолютный максимум тока через зашупленные диоды любого вывода	
		$\pm 2$ мА

Рисунок 2.6 – Пределные значения некоторых параметров MSP430.



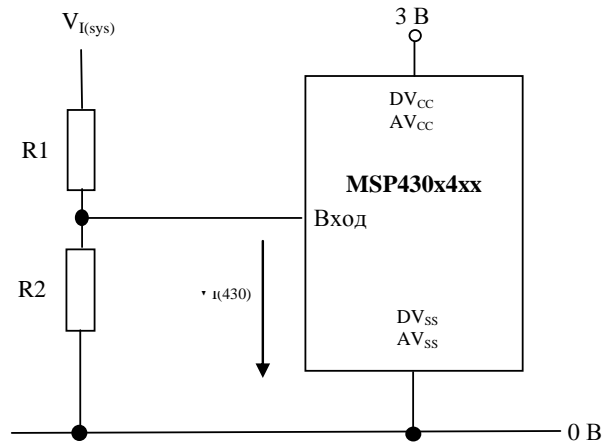


Рисунок 2.7 - Резистивный входной преобразователь для 5 В периферии.

Внешний сигнал от периферии  $V_{I(sys)}$  подаётся на вход MSP430. Значения резисторов R1 и R2 для наихудших случаев могут быть рассчитаны по формулам (2.1) – (2.3).

$$\frac{R1}{R2} < \frac{V_{(sysH)} \min - V_{IT(max)}}{V_{IN(max)} \times (1 + 2p)} \quad (2.1)$$

$$\frac{R1}{R2} > \frac{V_{(sysL)} \max - V_{IT(min)}}{V_{IT(min)} \times (1 - 2p)} \quad (2.2)$$

$$R1 \parallel R2 \ll \frac{DV_{cc}}{|I_{lkg}|} \quad (2.3)$$

Первые два неравенства обеспечивают превышение входным напряжением  $V_{I(430)}$  на входе MSP430 соответствующих наихудших пороговых значений. Третье неравенство обеспечивает отсутствие влияния тока утечки  $I_{lkg}$  входных защитных диодов MSP430 на входное напряжение  $V_{I(430)}$ . Для исключения протекания тока через эти диоды, необходимо выполнение условий (2.4) и (2.5):

$$V_{(sysH)} \max \times \frac{R2 \max}{R1 \min + R2 \max} < DV_{CC(min)} + 0,3 \quad (2.4)$$

$$V_{(sysL)} \min \times \frac{R2 \min}{R1 \max + R2 \min} > -0,3 \quad (2.5)$$

Например, входные напряжения от внешней системы  $V_{(sysH)} = 5,0 \text{ В} \pm 10\%$  и  $V_{(sysL)} = 0,5 \text{ В} \pm 10\%$ . Технологический разброс резисторов  $p = \pm 5\%$ . Минимальное напряжение питания микроконтроллера  $DV_{CC(min)} = 2,7 \text{ В}$  ( $3,0 \text{ В} - 10\%$ ). Учитывая

данные рисунка 2.4 на входные пороговые уровни  $V_{IT(max)}$  и  $V_{IT(min)}$  и величину входного напряжения  $V_{(sysH)min}$  получим:

$$\frac{R1}{R2} < \frac{V_{(sysH)min} - V_{IT(max)}}{V_{IT(max)} \times (1 + 2p)} = \frac{4,5 - 1,9}{1,9 \times (1 + 0,1)} = 1,244$$

Условие для входного напряжения низкого уровня  $V_{(sysL)max}$ :

$$\frac{R1}{R2} > \frac{V_{(sysL)max} - V_{IT(min)}}{V_{IT(min)} \times (1 - 2p)} > \frac{1,0 - 0,9}{0,9 \times (1 - 0,1)} = 0,1234$$

Для обеспечения незначительности влияния тока утечки  $I_{lkg}$ :

$$R1 \parallel R2 \ll \frac{DV_{cc}}{|I_{lkg}|} = \frac{3}{|\pm 50 \cdot 10^{-12}|} = 60 \text{ МОм} \quad (2.6)$$

Эти три расчётные формулы допускают достаточно широкий диапазон для выбора R1 и R2. Если выбрать  $R1/R2 = 1,0$  и  $R1 \parallel R2 = 600 \text{ кОм}$ , то соответственно получим  $R1 = 1,2 \text{ МОм}$  и  $R2 = 1,2 \text{ МОм}$ . для предотвращения протекания тока через входные защитные диоды MSP430 необходимо, чтобы выполнялись условия (2.4) и (2.5).

Подставляя в них числовые значения в данные неравенства, получим:

$$5,5 \times \frac{1,26 \cdot 10^6}{(1,14 + 1,26) \cdot 10^6} < 3,0;$$

$$0,0 \times \frac{1,14 \cdot 10^6}{(1,26 + 1,14) \cdot 10^6} > -0,3V.$$

В обоих случаях неравенства выполняются  $2,888 < 3,0$  и  $0,00 > -0,3$ . Выполнение неравенств не имеет большой важности, если значение тока через вывод MSP430 гораздо меньше, чем  $\pm 2 \text{ мА}$  (абсолютный, максимум допустимого значения входного тока). Именно такой случай имеет место в нашем примере при  $R1 \parallel R2 = 600 \text{ кОм}$ .

Приведенные выше расчётные формулы справедливы для следующих выводов MSP430, настроенных на ввод (предельные уровни напряжений взяты из технической спецификации на микроконтроллер MSP430F149):

а) все порты ввода/вывода P1...P6;

б) - входы кварцевого резонатора XIN и XT2IN ( $V_{IL(X)max}=0,2 \cdot DV_{CC}$ ,  $V_{IL(X)min}=0,8 \cdot DV_{CC}$ );

в) вход RST/NMI ( $V_{ILmax}=DV_{SS}+0,6$  В,  $V_{IHmin}=0,8 \cdot DV_{CC}$ );

г) входы компаратора, таймеров и UART/SPI;

д) входы АЦП ADC12.

Операционные усилители (ОУ) являются лучшим решением для входных преобразователей в тех случаях, когда они уже используются в системе (рисунок 2.8). Например, для ОУ TLC27L4 необходимо ограничить входные напряжения до уровня не выше, чем  $V_{DD} + 0,3$  В. Минимальное напряжение питания микросхемы TLC27L4  $V_{CC(min)} = 3$  В.

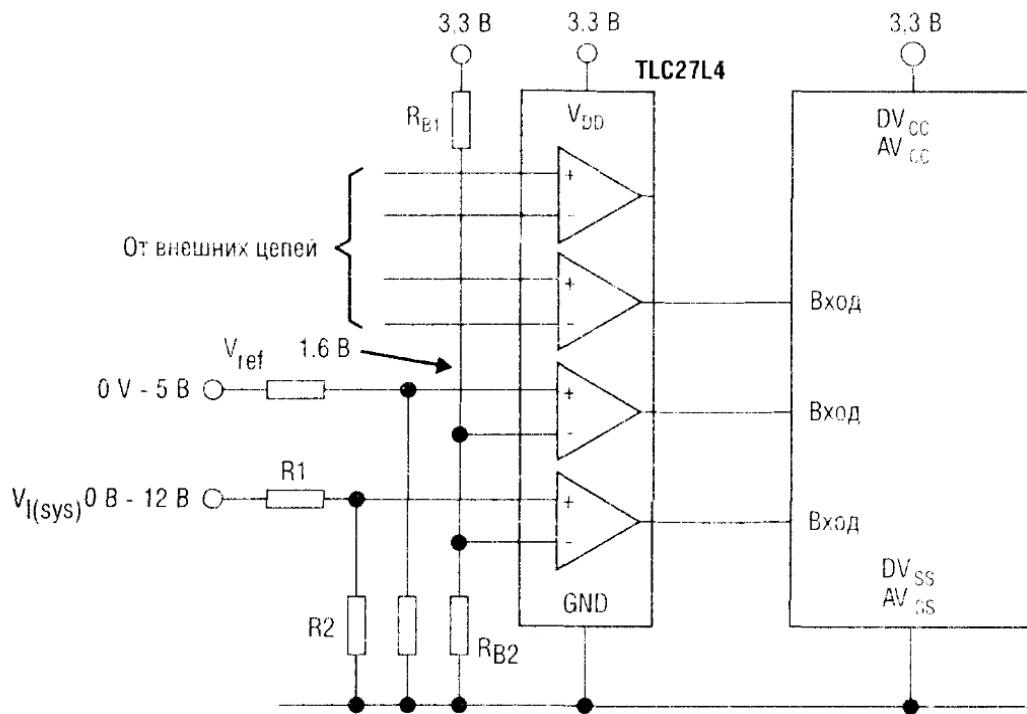


Рисунок 2.8 - Входной преобразователь на операционном усилителе.

Формулы для вычисления номиналов резисторов R1 и R2 по схеме, приведённой на рисунке 2.8, даны для наихудших случаев:

$$\frac{R1}{R2} < \frac{V_{(sysH) \min} V_{ref(max)}}{V_{ref(max)} \times (1 - 2p)} \quad (2.7)$$

$$\frac{R1}{R2} > \frac{V_{(sysL) \max} V_{ref(min)}}{V_{ref(min)} \times (1 - 2p)} \quad (2.8)$$

$$R1 \parallel R2 \ll \frac{DV_{CC}}{|I_{lkg}|} \quad (2.9)$$

В данной схеме ОУ используются компараторы, формирующие требуемый уровень напряжений на входах MSP430. Значения напряжений срабатывания компараторов определяются по формулам:

$$V_{ref(max)} = DV_{CC(max)} \times \frac{R_{B2} \max}{R_{B1} \min + R_{B2} \max} \quad (2.10)$$

$$V_{ref(min)} = DV_{CC(min)} \times \frac{R_{B2} \min}{R_{B1} \max + R_{B2} \min} \quad (2.11)$$

В качестве входного преобразователя для согласования с периферийными устройствами с напряжением питания 5 В и 12 В могут быть использованы буферные каскады транзисторных матриц, таких как ULN2003A (рисунок 2.9).

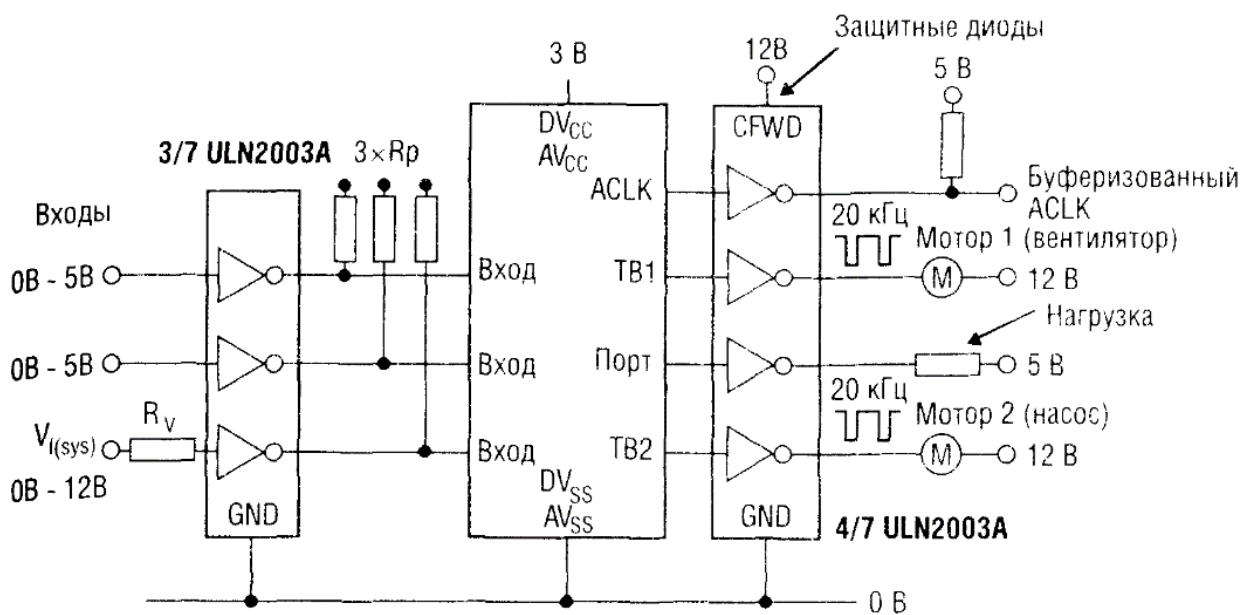


Рисунок 2.9 – Использование буферных транзисторных матриц для взаимодействия с аналоговой периферией.

Последовательный резистор  $R_V$  ( $p = \pm 5\%$ ) для входного сигнала амплитудой 12В ( $V_{(sysH) \min} = 11$  В) рассчитывается следующим образом:

$$R_V < \frac{V_{(sysH) \min} - V_{I(on) \min}}{(1 + p) \times I_{I(on) \max}} = \frac{11 - 2,4}{1,05 \cdot 1,35 \cdot 10^{-3}} = 6,6 \text{ кОм} . \quad (2.12)$$

Подтягивающий резистор  $R_p$  на входе MSP430 может быть рассчитан по формуле:

$$R_p < \frac{V_{CC} - V_{T(\max)}}{(1 + p) \times I_{CE \max}} = \frac{3 - 1,9}{1,05 \cdot 1,35 \cdot 10^{-6}} = 20,9 \text{ кОм}. \quad (2.13)$$

Для реализации интерфейсов периферии с напряжением питания 5 В можно использовать любые КМОП микросхемы, удовлетворяющие следующим условиям:

- а) работоспособность при питающем напряжении 3,3 В или менее;
- б) с явно указанной возможностью работы с входными уровнями более 3,3 В.

Указанным требованиям соответствуют микросхемы семейства АНС и LVC. Их можно подключить к источнику питания 3,3 В микроконтроллера MSP430. Однако нужно обязательно проверить, действительно ли выбранная микросхема допускает подачу входных сигналов с уровнем выше, чем уровень источника питания 3,3 В.

### 2.3.2 Выходные преобразователи входных сигналов

Выходные преобразователи не требуются для работы с ЖКИ и с пассивными датчиками. Их можно соответствующим образом подключать непосредственно к MSP430, в других случаях необходимо применение интерфейсных схем.

Согласование с периферией, имеющей напряжение питания  $V_{(sys)}$  до 16 В можно реализовать на базе счетверённого ОУ TLC27L4 (рисунок 2.10).

Резистивные делители на инвертирующих входах TLC27L4 создают напряжения около 1,5 В. Номиналы резисторов  $R_{B1}$  и  $R_{B2}$  должны удовлетворять условиям:

$$R_{B1} \parallel R_{B2} \ll \frac{DV_{CC}}{\sum I_{Ikg(Op)}} = \frac{3}{4 \cdot 0,7 \cdot 10^{-12}} = 1,07 \text{ ГОм}.$$

В качестве выходных преобразователей 3-вольтовых с 5-вольтовыми схемами можно использовать практически любые ТТЛ совместимые микросхемы, например, такие, как семейства НСТ и АНСТ. То же самое справедливо и для биполярных ИС.

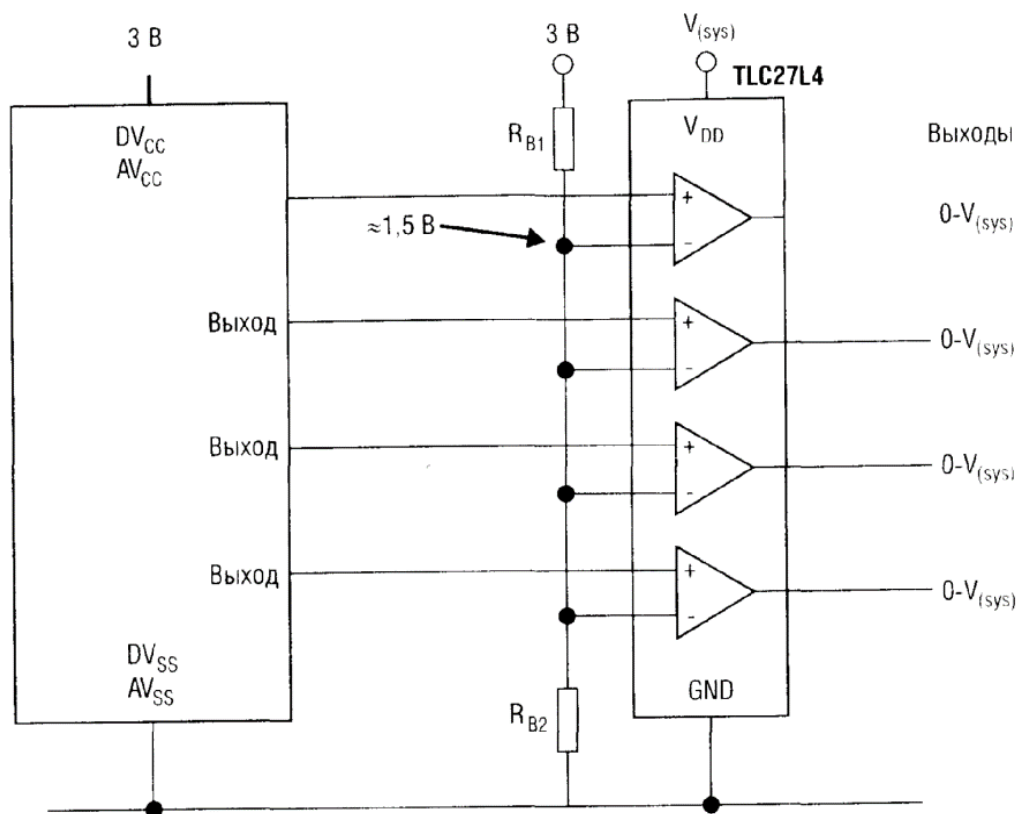


Рисунок 2.10 - Выходной преобразователь на операционном усилителе.

### 2.3.3 Выбор интерфейсных схем модуля ввода

Проведенный аналитический обзор входных и выходных преобразователей уровней сигналов позволяет окончательно выбрать конкретные варианты интерфейсных схем.

В случае 8 канального аналого-цифрового преобразования сигналов аналоговых датчиков со стандартным выходным сигналом 5 В (раздел 1), интерфейсная схема будет соответствовать рисункам 2.2 и 2.6. При выборе (программным путем) значения опорного напряжения для АЦП ADC12 микроконтроллера MSP430F1491 равным 2,5 В, коэффициент передачи резистивного делителя  $K=0,5$ .

При одинаковых значениях сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$  получается требуемый коэффициент передачи. В соответствии с приведенными выше рекомендациями были выбраны резисторы с сопротивлением по 100 кОм каждый.

Можно рассчитать технологический (производственный) допуск  $p$  на эти резисторы. При заданной погрешности интерфейсной схемы  $\delta = \pm 1\%$  получим:

$$p = \frac{\delta}{2(1-K)} = \pm 1\%. \quad (2.14)$$

Для управления ТТЛ-КМОП периферией (опционально) с помощью MPS430 используется интерфейсная схема, соответствующая рисунку 2.7. Для обеспечения гальванической развязки использованы две микросхемы оптопар ACSL-6410. такое подключение обеспечит защиту модуля и согласование КМОП логических уровней микроконтроллера MSP430 с микросхемами ТТЛ и, естественно, КМОП серий.

Буферизированные выходы модуля (опция) реализованы в соответствии с рисунком 2.7 на микросхеме UNL2003. Микросхема представляет собой высоковольтную транзисторную матрицу с максимальным выходным током до 500 мА. Каналы реализованы по схеме «открытый коллектор», поэтому требуют подключения внешних резисторов. Номинальные значения этих резисторов определяются уровнем тока нагрузки, который должен обеспечить каждый из каналов. Так как в техническом задании не указаны значения токов нагрузки, резисторы были выбраны 10 кОм.

## **2.4 Обоснование выбора элементной базы модуля ввода**

Основные элементы - управляющий микроконтроллер и АЦП уже были выбраны ранее, поэтому выберем оставшиеся элементы схемы модуля ввода данных.

### **2.4.1 Обоснование выбора источника опорного напряжения**

Микросхема АЦП ADS8332 не имеет собственного источника опорного напряжения, поэтому в разрабатываемом модуле была использована микросхема прецизионного источника опорного напряжения AD780AR фирмы Analog Devices. Эта микросхема формирует напряжение  $2,500 \pm 0,001$  В ( $\pm 0,02\%$ ) с типовым значением температурного коэффициента ТКН всего  $3 \cdot 10^{-6}$   $1/^\circ\text{C}$  и низким уровнем шума 100 нВ. В случае проведения более точных измерений измеряется точное значение опорного напряжения, это значение заносится в АЦП и далее используется для внесения поправок в значения измеренных входных напряжений.

### **2.4.2 Обоснование выбора оптопар гальванической развязки**

Проведенный обзор предложений на рынке оптопар показал, что для гальванической развязки интерфейсов обмена данными (с АЦП и ТТЛ\КМОП периферией) удачным решением можно считать использование двунаправленных высокоскоростных оптронов ACSL-6410 компании Avago Technologies.

Оптроны ACSL-6410, расположенные в компактном корпусе для поверхностного монтажа, обеспечивают дуплексную, двунаправленную, гальванически развязанную передачу данных на скорости до 15 Мбод, что делает их идеальным решением для изоляции аналогово-цифровых преобразователей, параллельных шин и периферийных интерфейсов.

При максимальном быстродействии 16 разрядного (16 bit) АЦП в 500 тысяч измерений в секунду потребуется скорость передачи данных на управляющий МК 8 Мб\с, что соответствует быстродействию выбранной оптопары.

Оптроны микросхемы ACSL-6410 имеют широкий диапазон напряжения питания (3-5,5 В) и выдерживают до 2500 В переменного напряжения (RMS) в течении 1 минуты. Диапазон рабочих температур от минус 40 до плюс 100°C, стоимость менее 2\$ (рисунок 2.11).



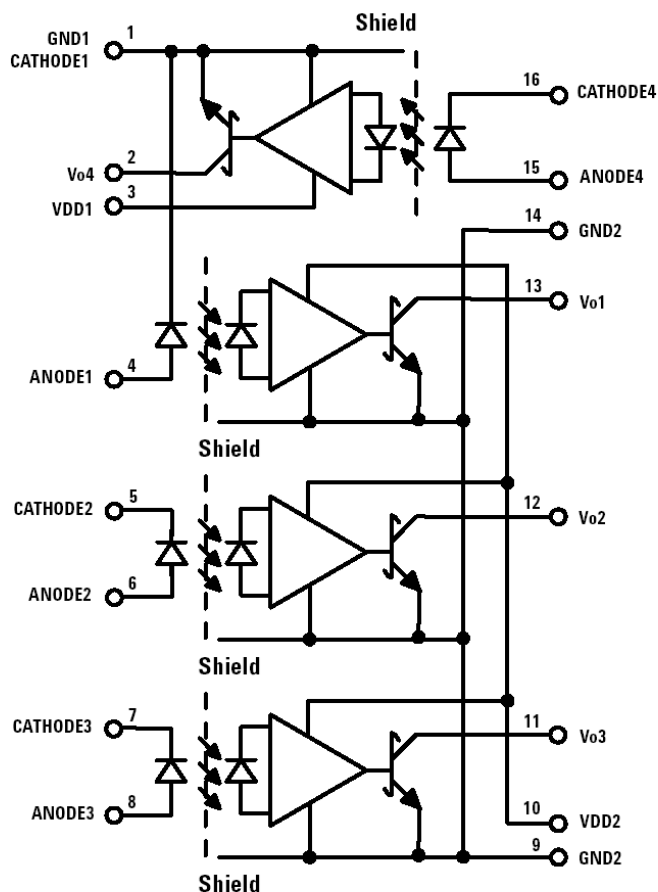


Рисунок 2.11 – Гальваническая развязка интерфейса АЦП.

### 2.4.3 Обоснование выбора интерфейса управления ЖК индикатором

Для повышения функциональности ЖКИ, упрощения программного обеспечения и аппаратной реализации интерфейсов в настоящее время широко применяются символьные ЖК-модули со встроенным контроллером знакогенератора и драйвером управления. Для связи с микроконтроллером используется простой параллельный интерфейс.

В большинстве таких модулей используется контроллер HD44780 или его аналоги. Де-факто, протокол данного контроллера от Hitachi Semiconductor стал стандартом, что сделало возможным использование программных библиотек. Контроллер поддерживает до 80 цифробуквенных символов для поддержки модулей с конфигурацией 2x14, 2x16, 2x20, 2x24, 2x40, 4x20 символов.

Чаще всего для подключения ЖКИ, аналогичных HD44870, используется однорядный разъем с 14 контактами, расположенными в линию с шагом 0,1 дюйма. Назначение этих контактов указано на рисунке 2.12.

Так в нашем случае MSP430F1491 имеет достаточное количество линий ввода-вывода, будем использовать 8-битную шину данных порта P4. При этом следует учитывать наличие еще трех служебных линий (E, R/W, R/S).

## **2.5 Организация интерфейса RS-485**

Обмен данными по интерфейсу RS-485 осуществляется сигналами, отличными от уровней ТТЛ и непосредственный обмен данными между разработанным модулем и другими модулями ADAM-4000 невозможен. Поэтому для организации указанного обмена данными следует предварительно выбрать соответствующую схему согласования уровней сигналов, т.е. трансивер.

При создании трансиверов применяют гальваническую развязку питания, цифровые изоляторы, а также некоторые пассивные элементы защиты. Как правило, при добавлении ESD-защиты (от статического электричества) получается от трех до шести микросхем (при развязке с помощью оптронов). Интегрированные в кристалл трансивера защиты дают возможность сэкономить на дополнительных микросхемах и пассивных элементах.



Рисунок 2.12 - Назначение контактов ЖК индикатора типа HD44870.

При выборе трансиверов основным критерием является низкая цена и ми-

нимальное энергопотребление. Поэтому сразу следует отказаться от микросхем трансиверов RS-485, требующих трех источников питания +5 В и  $\pm 12$  В.

На рисунке 2.13 приведена схема изолированного интерфейса RS-485, используемая во многих модулях системы сбора данных ADAM-4000.

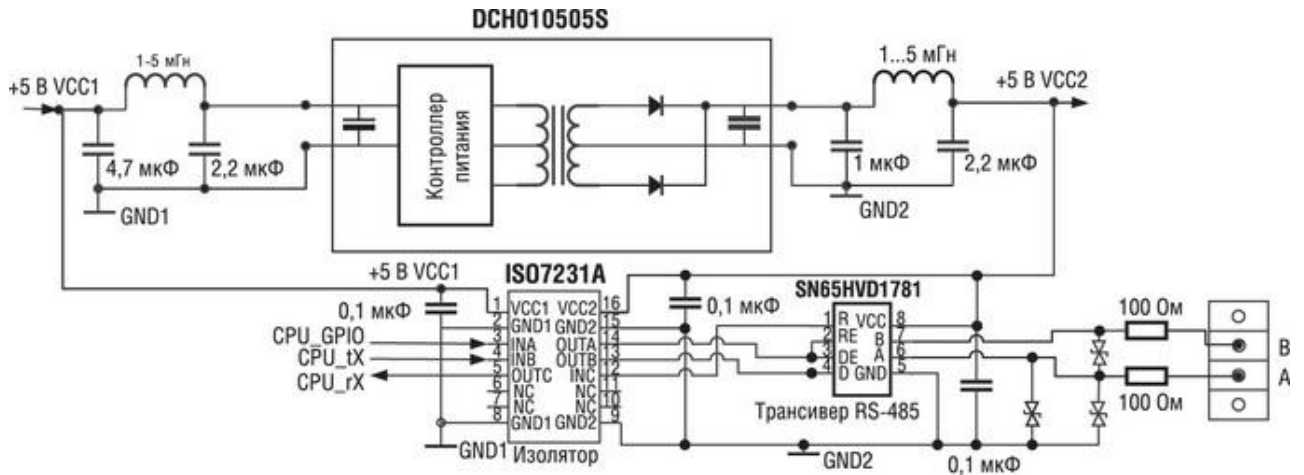


Рисунок 2.13 - Типовая схема изолированного интерфейса RS-485.

Питание организовано на базе высокоэффективного модуля DCH010505D компании Texas Instruments (TI), имеющего гальваническую развязку 3 кВ в стандартном SIP-7 корпусе.

Для развязки линий передач использован цифровой изолятор ISO7231A, имеющий скорость передачи данных 1 Мбит\с, емкостную развязку 4 кВ и наименьшие среди аналогов задержки. Трансивер RS-485 SN65HVD1781 от TI выдерживает большое напряжение (16 кВ ESD), приложенное к линиям передачи.

Используя трансивер SN65HVD1781, можно решить часть проблем, с которыми могут столкнуться разработчики, использующие стандартные решения для RS-485. Предложенный вариант является одним из самых надежных, однако используя более современный скоростной (до 20 Мб\с) изолированный трансивер ISO3085 интерфейса RS-485 можно еще более уменьшить его схему и повысить качество. Схема, приведенная на рисунке 2.14, была принята за основу организации изолированного интерфейса RS-485 разработанного модуля ввода.

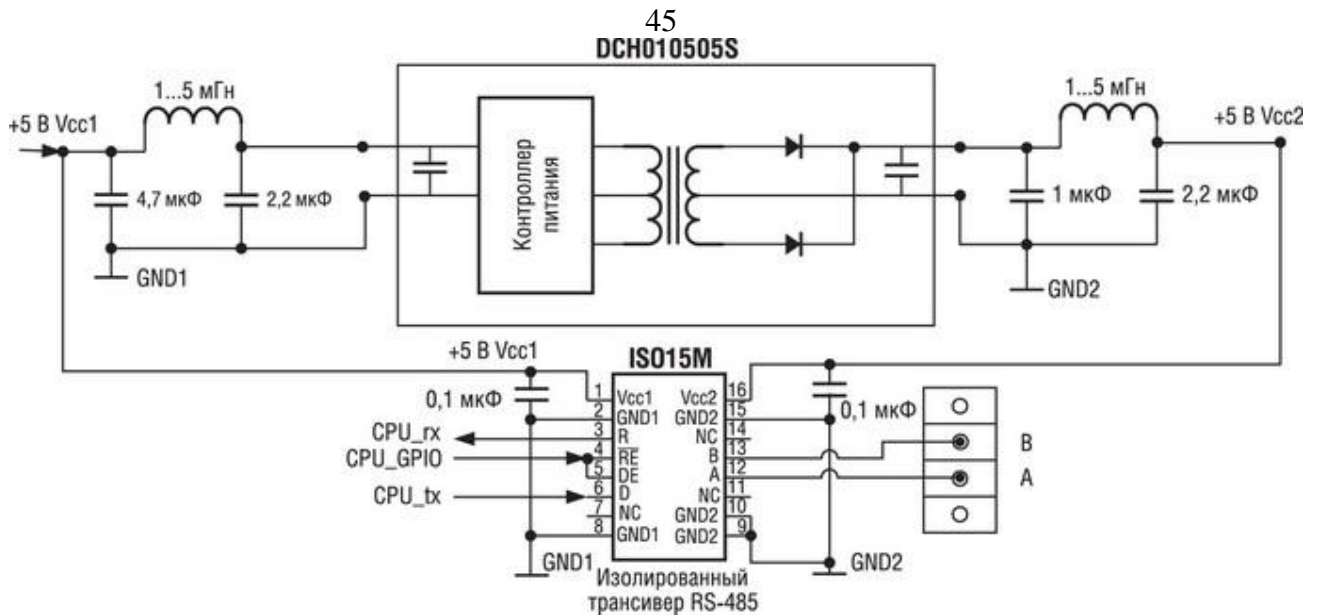


Рисунок 2.14 - Изолированный трансивер интерфейса RS-485.

Трансивер ISO3085 поддерживает «горячее подключение», полностью соответствует спецификациям стандарта RS-485, обладает высокой отказоустойчивостью в экстремальных условиях и имеет срок службы более 25 лет при 125°C.

Встроенный изолятор с максимальным напряжением пробоя 4 кВ, защита от статических напряжений 16 кВ обеспечивают весьма эффективную защиту разработанного модуля при его работе даже в экстремальных условиях эксплуатации (от минус 55 до плюс 125°C). Схема изолированного трансивера приведена на рисунке 2.15.

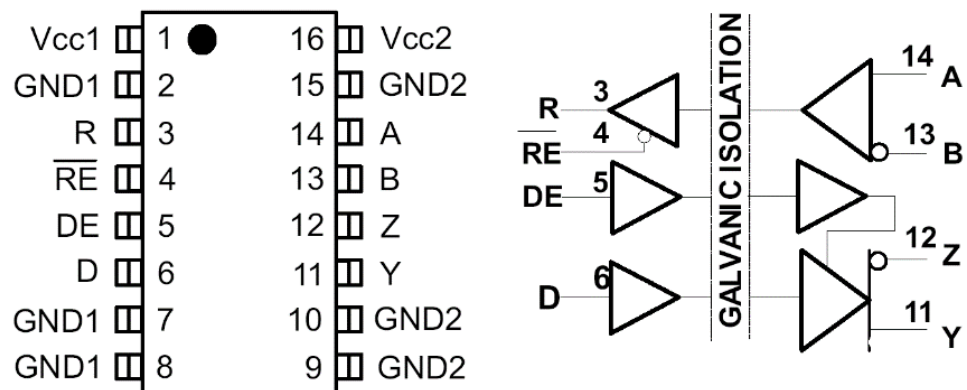


Рисунок 2.15 - Схема изолированного трансивера ISO3085.

## 2.6 Расчет надежности модуля аналогового ввода

Для расчета надежности применим аналитический метод. Он целесообразен при проектировании радиоаппаратуры и при анализе статистических данных,

полученных в процессе эксплуатации или испытаний.

Суть расчета: определение числовых значений основных показателей надежности: вероятности безотказной работы  $P(t)$ , интенсивности отказов  $\lambda(t)$  и наработки на отказ  $T_0$ . Расчет производят по известным интенсивностям отказов элементов  $\lambda_i(t)$ , которые входят разработанный модуль.

Расчет ведется с помощью ориентировочного метода. При этом считается что изделие работает при температуре окружающей среды  $+20^\circ\text{C}$ , а все компоненты имеют коэффициент нагрузки  $K_H=1$ . Метод можно использовать только на этапе проектирования с целью оценки максимального уровня надежности.

В период нормальной эксплуатации радиоаппаратуры интенсивность отказов ее компонентов подчиняется экспоненциальному закону распределения. Поэтому суммарную интенсивность отказов  $\lambda_\Sigma(t)$  можно считать величиной постоянной во времени:

$$\lambda_\Sigma(t) = \sum_{i=1}^k N_i \lambda_i = \text{const}, \quad (2.15)$$

где  $\lambda_i(t)$  - интенсивность отказов  $i$ -го элемента,

$N_i$  – количество однотипных  $i$ -х элементов,

$k$  - количество групп элементов.

В этом случае вероятность безотказной работы устройства за время  $t$  определяется выражением

$$P(t) = e^{-\lambda_\Sigma t}. \quad (2.16)$$

Для аналитического расчета надежности используем принципиальную электрическую схему разработанного модуля аналогового ввода, данные управляющих файлов разработанной печатной платы и справочные данные по интенсивности отказов отдельных радиокомпонентов схемы.

В таблице 2.1 приведены результаты расчета основных показателей надежности разработанного модуля аналогового ввода.

Таблица 2.1 - Данные расчета надежности модуля

Наименование элемента	Обозначение по схеме	Количество, $N_i$	Интенсивность отказов, $\lambda_i \cdot 10^{-6}$ , 1/ч	$N_i \lambda_i \cdot 10^{-6}$ , 1/ч
Конденсаторы К10-17	С	15	0,1	1,5
Конденсаторы К50-35	С	6	0,25	1,5
ИС аналоговые	DA	4	0,03	0,12
ИС цифровые	DD	7	0,02	0,14
Резисторы С2-33	R	23	0,2	4,6
Переменный резистор CG3-16	R	1	0,8	0,8
Индикатор DV16100	HG	1	1,4	1,4
Разъемы	X	6	0,4	2,4
Резонатор кварцевый	ZQ	1	1,3	1,3
Фильтры НЧ	A	2	1,8	3,6
Паяные соединения	-	357	0,01	17,36

Итого

$$\lambda_{\Sigma} = 17,36 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час}$$

Наработка на отказ разработанного модуля составит:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{1}{17,36 \cdot 10^{-6}} = 57604 \approx 57,6 \text{ тысячи часов} \quad (2.17)$$

или более 6,5 лет непрерывной работы. Вероятность безотказной непрерывной работы за 1000 часов составит  $P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} = e^{-0,017} = 0,983$ .

Проведенные расчеты показывают, что разработанный модуль ввода обладает высокой надежностью. Это позволит минимизировать его сервисное обслуживание, т.к. в процессе работы потребуется 1 внеплановый ремонт в течение 10 летнего срока службы.

### **3 Конструкторская часть. Технологическое обеспечение разработки модуля ввода**

#### **3.1 Проектирование печатной платы интерфейсного модуля**

В разработанном модуле для защиты устройства от воздействия высокого статического (ESD) и переменного (RMS) напряжений использована гальваническая развязка по питанию и по линиям ввода-вывода аналоговых и цифровых сигналов. Из соображений минимизации ущерба в случае превышения допустимых по ТЗ уровней этих напряжений, модуль ввода выполнен в виде двух печатных плат – платы питания и гальванической защиты и платы микроконтроллера.

Разработку печатной платы будем проводить автоматизированным способом с помощью специальной программы трассировки печатных плат – САПР ПП. Компаниями разработчиками предлагается весьма широкий выбор таких программных пакетов. Как правило, это сквозные системы проектирования, где разработка проекта начинаем с создания в программе принципиальной схемы и заканчиваем формированием управляющих файлов для оборудования изготовления фотошаблонов и сверления отверстий.

САПР ПП DipTrace занимает одно из ведущих положений в проектировании печатных плат для мелкосерийного производства. Этот программный продукт разработан российской фирмой Novarm. Является полнофункциональной системой для разработки принципиальных схем и печатных плат. Имеет удобный, интуитивный, Windows-подобный и, конечно, русифицированный интерфейс. Пакет содержит четыре программных модуля (рисунок 3.1).

В данной работе в качестве примера была спроектирована печатная плата микроконтроллера разработанного модуля ввода с помощью данной САПР DipTrace.

В начале проектирования была построена принципиальная электрическая схема модуля в программе Schematic. Недостающие в используемых библиотеках корпуса элементов были созданы в программе ComEdit - редакторе корпусов для печатной платы. В программе SchemEdit (редактор компонентов) были разработаны оригинальные символы радиокомпонентов и осуществлена их привяз-



ка к корпусам. Построенная в редакторе DipTrace принципиальная схема приведена на рисунке 3.2.

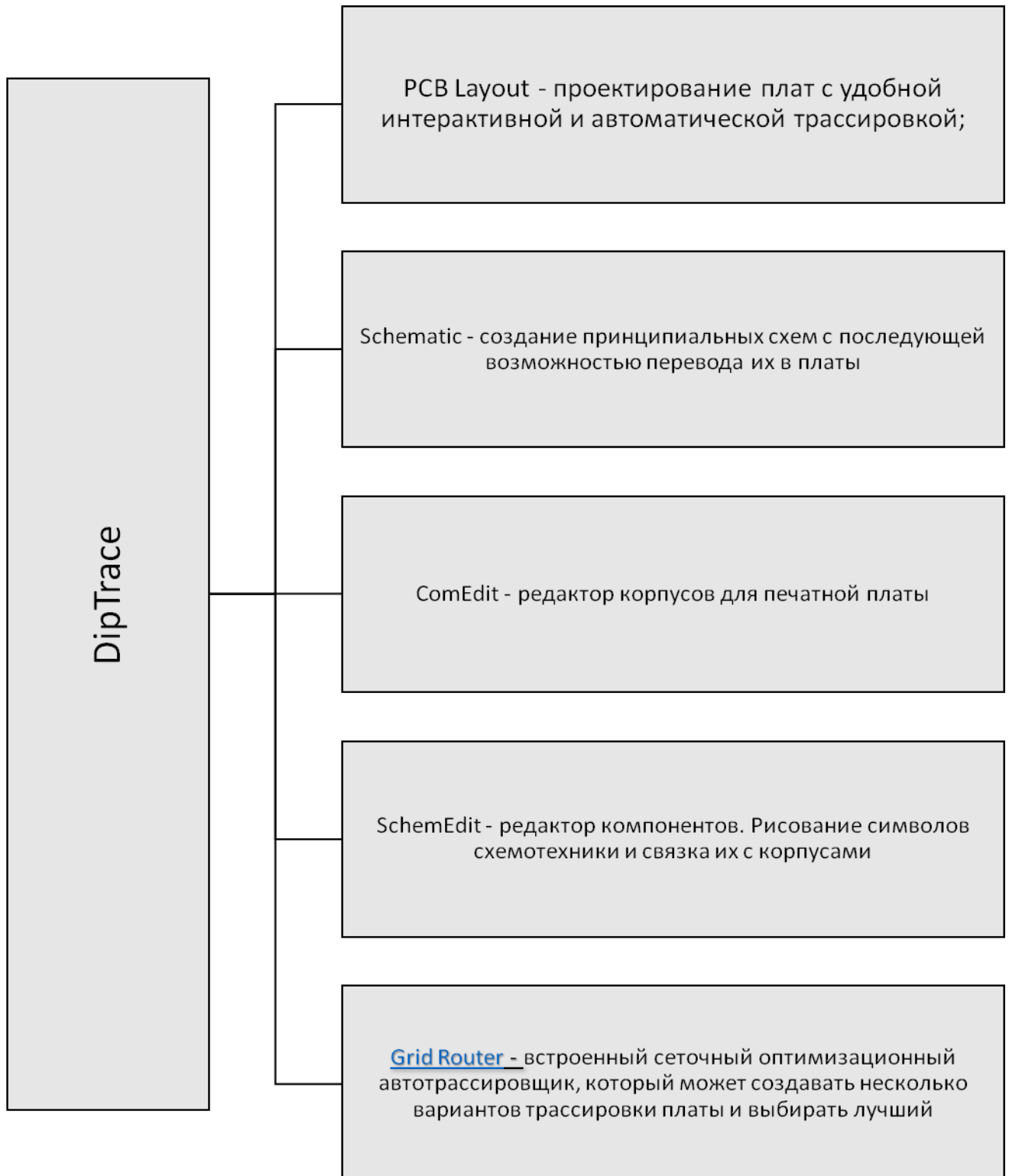


Рисунок 3.1 – Состав САПР ПП DipTrace.

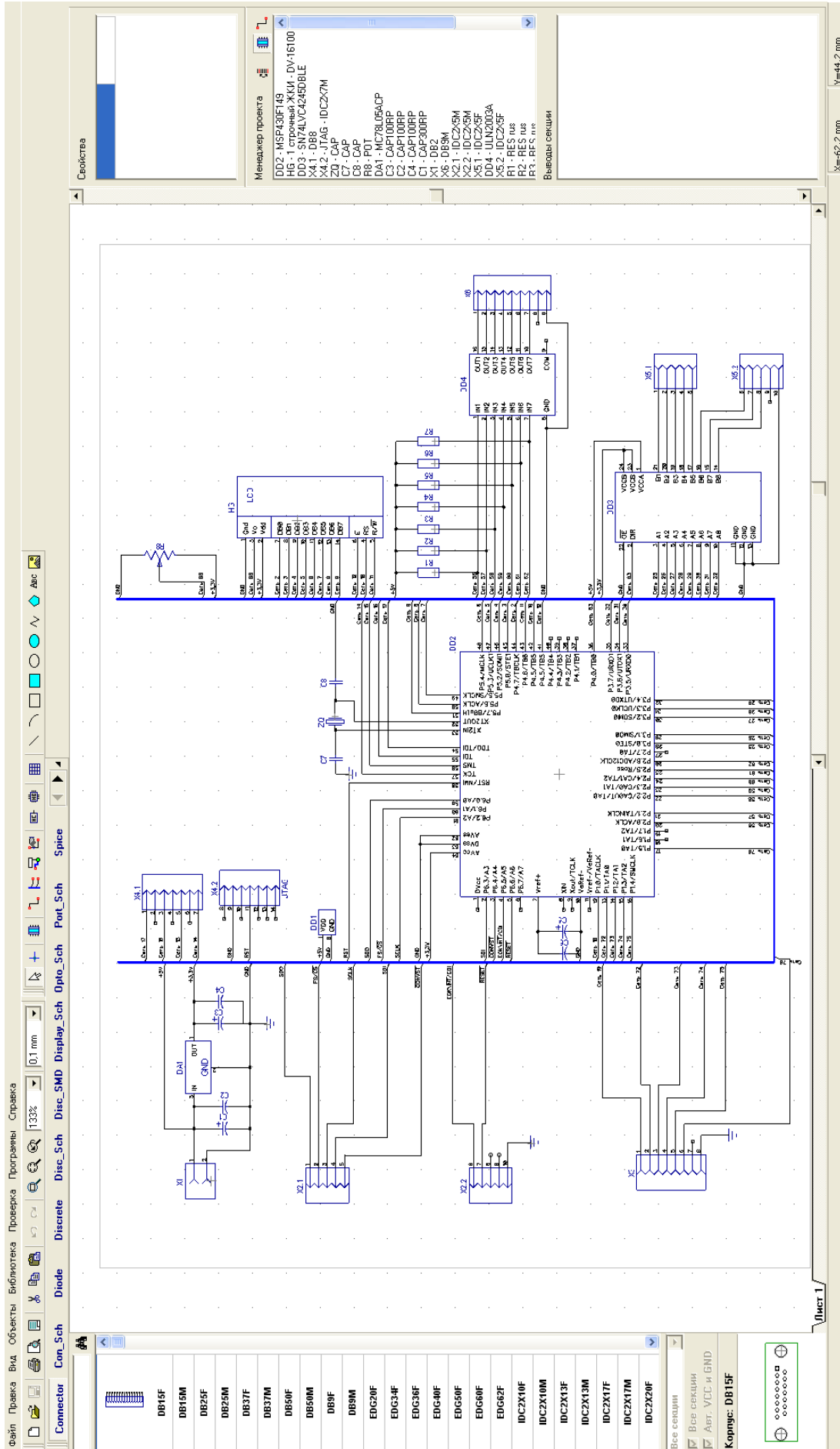


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема разработанного модуля ввода в программе DipTrace.

Далее был осуществлен перевод электрической схемы платы МК в программу проектирования печатных плат с интерактивной и автоматической трассировкой PCB Layout.

При автотрассировке может быть несколько режимов создания трасс. По умолчанию автотрассировщик не касается уже разведенных трасс и создает новые только на основе логических связей. После его применения автотрассировщика рекомендована проверка и ручная коррекция разведенных трасс.

Из главного меню были выбраны команды «Трассировка\Параметры трассировки» и установлены: ширина трасс, расстояние между трассами, расстояния до выводов. Все параметры соответствуют 4 классу точности печатных плат. Результаты трассировки печатной платы МК в программе PCB Layout приведены на рисунке 3.3.

Для создания конструкторских документов в программе DipTrace существует экспорт печатной платы в \*.dxf формат. Этот формат поддерживают основные PCB CAD программы. Чтобы осуществить экспорт, необходимо выбрать из главного меню пункт «Экспорт \ DXF», нажать «Сохранить файл», потом экспортировать этот файл в нужную программу (AutoCAD, Corel Draw).

### **3.2 Программирование флэш-памяти микроконтроллеров MSP430F14x**

Флэш-память в микроконтроллерах MSP430F14x адресуется побитно, побайтно или пословно и может перепрограммироваться. Модуль флэш-памяти имеет интегрированный контроллер, управляющий процессом стирания и программирования. Контроллер имеет три регистра, тактовый генератор и генератор напряжения для обеспечения напряжений стирания и программирования.

Флэш-память в МК обладает следующими возможностями (рисунок 3.4).

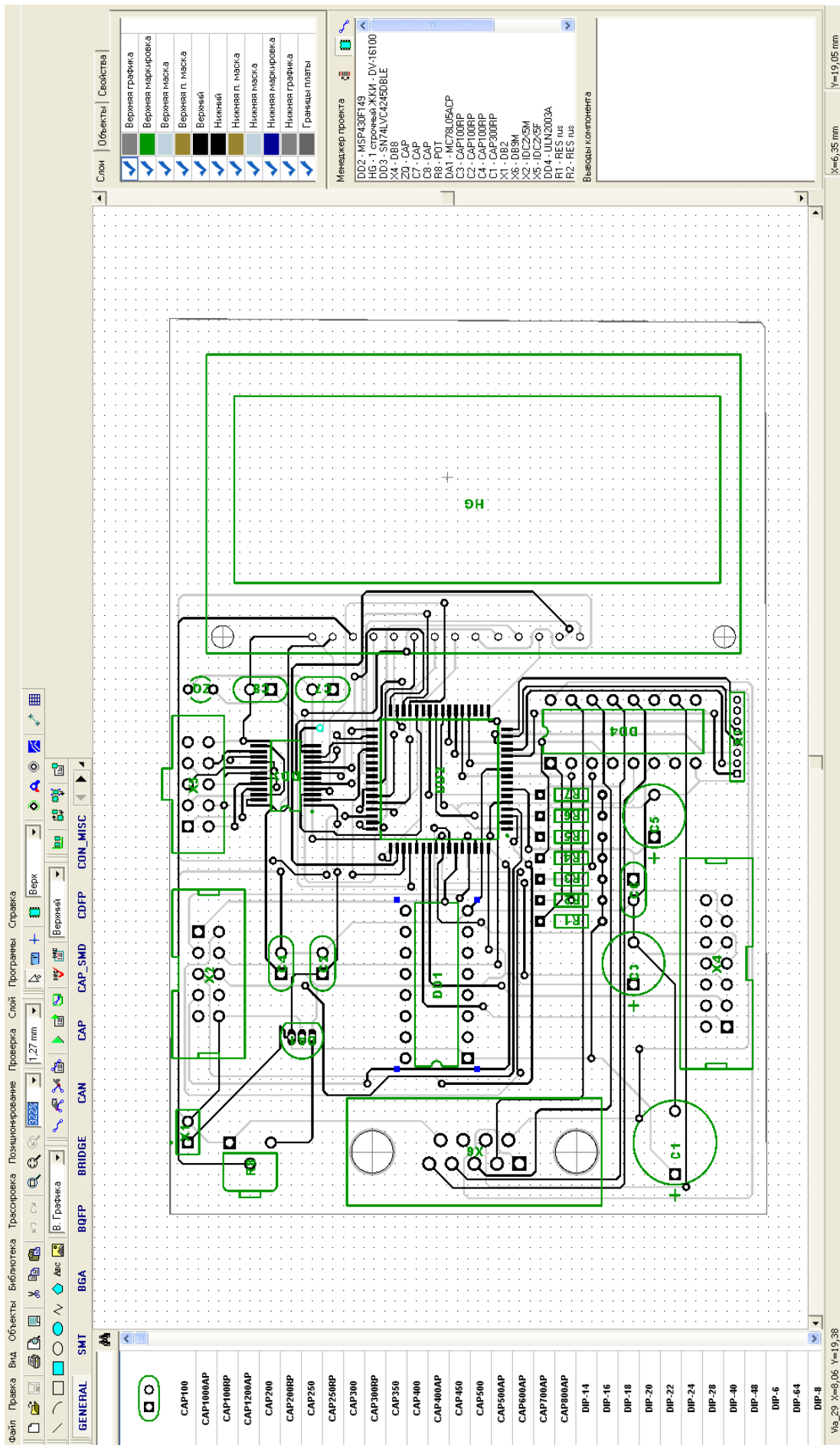


Рисунок 3.3 – Разработанная в программе РСВ Layout печатная плата МК модуля ввода (верхний слой).



Рисунок 3.4 – Возможности флэш –памяти микроконтроллера.

### 3.2.1 Структура и функционирование флэш-памяти

Флэш-память в *msp430*, называемаяся NOR-флэш (в отличие от NAND-флэш, которая работает, например, в типичном USB флэш-накопителе). Она работает за счёт захвата заряда в изолированной области, так называемый, «плавающий затвор». Заряд в плавающем затворе изменяет состояние транзистора и определяет значение считываемого бита. Заряд выполняет работу переключателя, положительный заряд открывает путь электронам, «замыкает» ключ и мы читаем логическую единицу. Отрицательный заряд держит ключ разомкнутым, и мы читаем логический ноль.

Когда мы стираем флэш-память, каждый бит переключается в состояние,

при котором затвор заряжен положительно. Таким образом, значение «пустого» бита всегда будет читаться как единица; байт стёртой флэш-памяти будет читаться как 0xFF. Можно запрограммировать бит в «0» с применением высокого управляющего напряжения на затворе, которое заставит стечь заряд с плавающего затвора на исток. В результате отрицательный заряд на плавающем затворе сохранится пока не произойдёт какой-нибудь физический эффект наподобие квантового туннелирования, который принимается за 100 лет для перезаписи бита.

Флэш-память в msp430 организована по частям, называемым сегментами. Основная часть памяти делится на сегменты по 512 байт. (Это означает, что существуют 4 сегмента в основной памяти как для g2211, так для g2231, в каждом из которых по 2КБ) Каждый сегмент делится на блоки по 64 байта. Кроме того, более 512 байт, входящие в каждый msp430, делится на сегменты либо по 64, либо по 128 байт (один или 2 блока соответственно). Эти сегменты составляют часть информационной памяти контроллера. Контроллеры серии Value Line, которые поставляются с Launchpad, имеют 4 сегмента памяти по 64 байта каждый и называются сегменты A-D.

Физическая структура ячеек очень важна. Прежде всего, когда мы стираем флэш-память, мы можем стереть только весь сегмент за один раз. Это означает, что в то время, когда мы должны изменить в одной ячейке ноль на единицу, должна быть стёрта каждая ячейка в сегменте. Когда мы программируем флэш-память, высокое напряжение подаётся через весь блок, даже если мы программируем только одну ячейку. Это напряжение вызывает стресс для ячеек флэш, поэтому мы не можем превышать указанное «суммарное время программирования», обычно — 10мс. Очистка освобождает от стресса, и по сути сбрасывает наш совокупный таймер в 0. Эти оговорки влияют на скорость программирования и на то, как часто должен быть стёрт блок.

При типичных используемых нами скоростях (от 257 до 476 кГц) можно запрограммировать целый блок дважды. Нельзя однако запрограммировать один и тот же байт много раз, даже если мы не программируем любой другой байт в

блоке. По правилам, если достигается 10мс времени программирования или пишется один и тот же байт два раза, блок (и, следовательно, весь сегмент для основной памяти) должны быть стёрты.

Сегменты В-D памяти имеют свои достоинства. Так, сегмент А специально отведён Texas Instruments для хранения информации, сохраняющейся независимо от любого изменения при программировании. Например, в этом сегменте хранятся заводские калибровки. В результате этот сегмент заблокирован, и придётся установить бит разрешения записи перед выполнением любой инструкции, стирания или программирования этого сегмента. Для обеспечения целостности данных, хранящихся в сегменте А, одно слово (2 байта) пишется как контрольная сумма. Если что-либо изменяется в сегменте, вычисление контрольной суммы не удастся.

Структура модуля флэш-памяти и контроллера показана на рисунке 3.5. Как видно из рисунка, флэш-память в MSP430 разбита на сегменты.

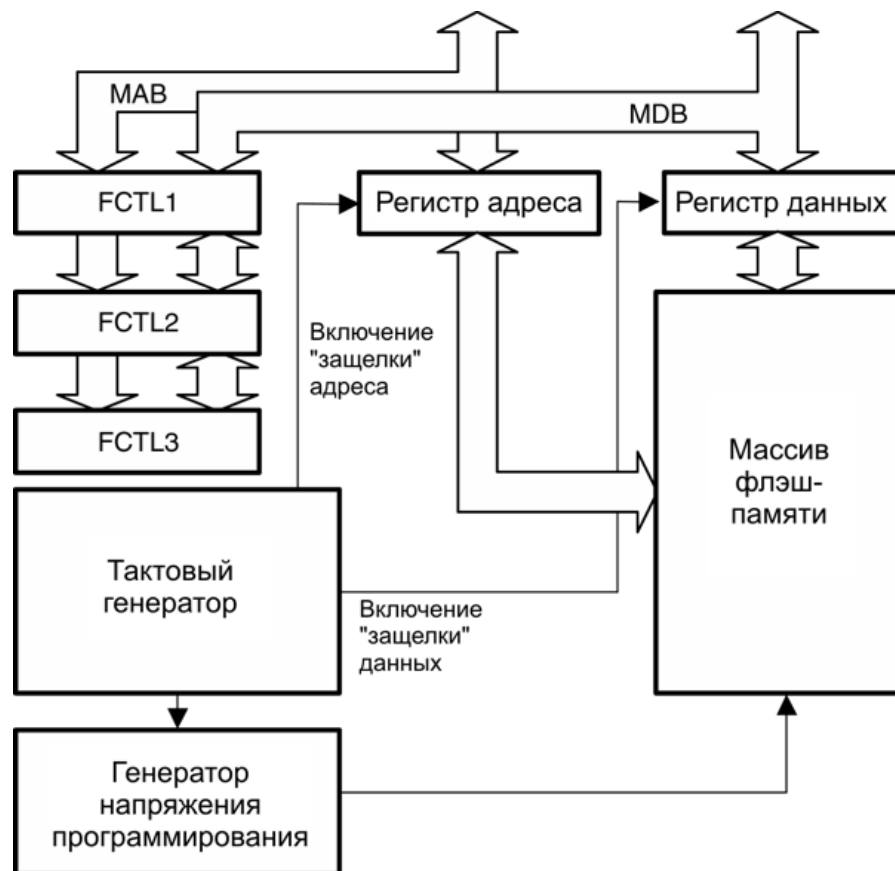


Рисунок 3.5 - Структура модуля флэш-памяти.

Операции записи и стирания управляются тактовым генератором флэш-

памяти, показанным на рисунке 3.6.

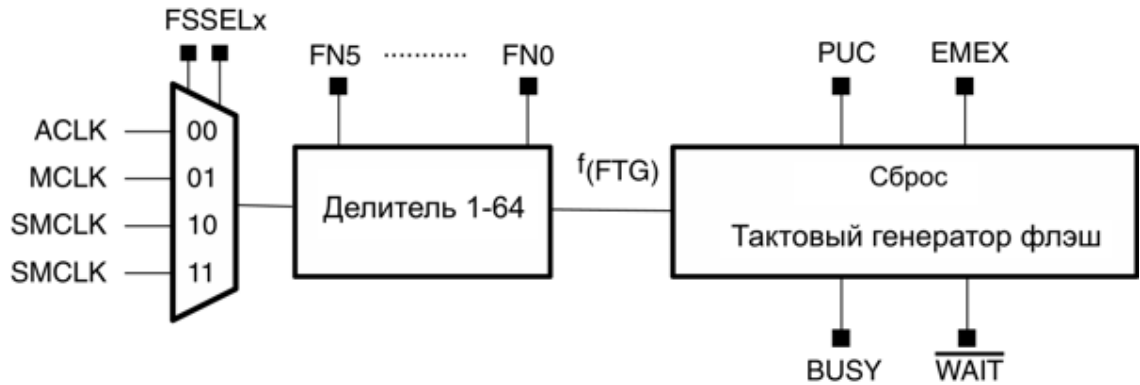


Рисунок 3.6- Структура тактового генератора флэш-памяти.

### 3.2.2 Программирование устройств MSP430 с флэш-памятью

Имеется три способа программирования флэш-устройств MSP430. Все способы поддерживают внутрисистемное программирование (ISP) (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 - Способы программирования флэш-устройств MSP430.

Каждое MSP430 устройство с флэш-памятью содержит самозагрузчик



BSL. Он позволяет пользователю читать или программировать флэш-память или ОЗУ с помощью последовательного интерфейса UART3. Доступ к флэш-памяти MSP430 через BSL защищен 256-разрядным паролем, определяемым пользователем.

Способность ЦПУ в MSP430 записывать собственную флэш-память позволяет реализовать внутрисистемное программирование внешними пользовательскими решениями, как показано на рисунке 3.8.

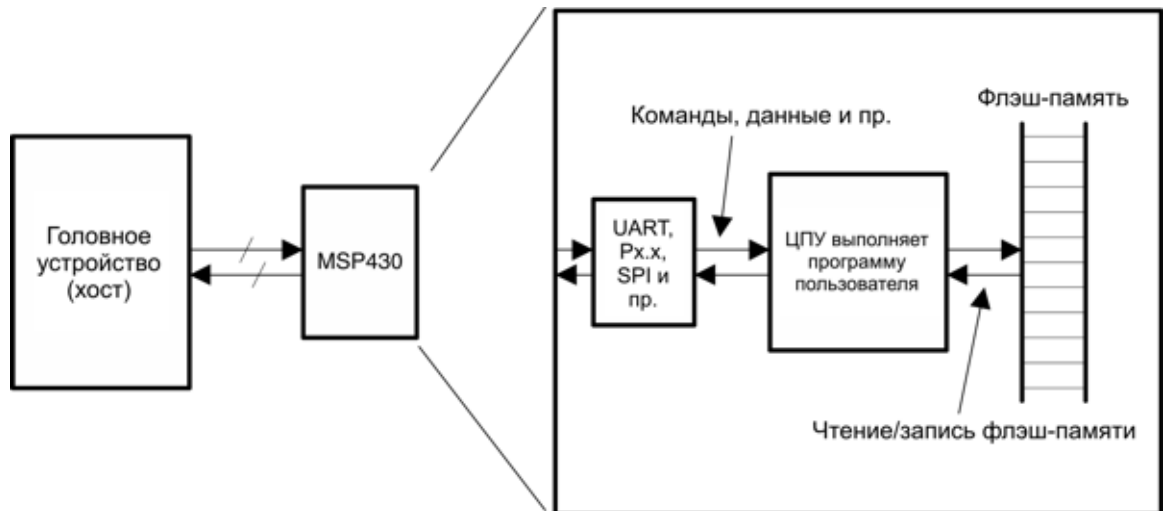


Рисунок 3.8 - Решение по программированию, разработанное пользователем.

Пользователь может выбрать, каким образом данные будут поступать в MSP430 с использованием любого имеющегося доступного способа (UART, SPI и прочее). Разработанное пользователем программное обеспечение может получать данные и программировать флэш-память.

### 3.3 Средства отладки и программирования микроконтроллера MSP430

Микроконтроллер может стать основой любой электронной схемы только в том случае, когда в его памяти будет размещена специально разработанная программа управления микроконтроллером. Для решения этой задачи необходимо наличие нескольких составляющих:

- а) исправный микроконтроллер, то есть такой, в котором отсутствуют какие-либо повреждения;
- б) персональный компьютер, оснащенный операционной системой Windows;

в) специальная программа управления процессом программирования (прошивки) микроконтроллера;

г) аппаратный программатор, физически связывающий микроконтроллер и персональный компьютер.

Схема прошивки микроконтроллеров семейства MSP430 показана на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Схема прошивки микроконтроллеров семейства MSP430.

Программатор подключен к микроконтроллеру (МК) посредством собственного интерфейса программирования, причем для MSP430 может быть использовано два варианта таких интерфейсов. Первый - JTAG-интерфейс, он позволяет, помимо простой «прошивки», осуществлять внутрисхемную отладку (ISP) программы микроконтроллера.

Второй интерфейс называется BSL (bootstrap loader interface). Он использует встроенную на этапе промышленного изготовления МК программу - загрузчик, которая создает протокол последовательного обмена данными.

### 3.4 Среда программирования IAR для разработки ПО модуля ввода

Работа с микроконтроллером в среде IAR. Во первых, с сайта [www.iar.com](http://www.iar.com) следует скачать и установить среду разработки IAR Embedded Workbench для STM8 в редакции Kickstart (рисунок 3.10).

Наипростейший путь создания нового проекта – это воспользоваться шаблоном-примером. В каждом архиве периферийной библиотеки имеется такой пример, который после разархивирования находится в папке Project\STM8S\_StdPeriph\_Template\EWSTM8\. Для того, чтобы упростить себе задачу, используется периферийная библиотека с шаблоном проекта именно для своей платы и в этом архиве найдем файл

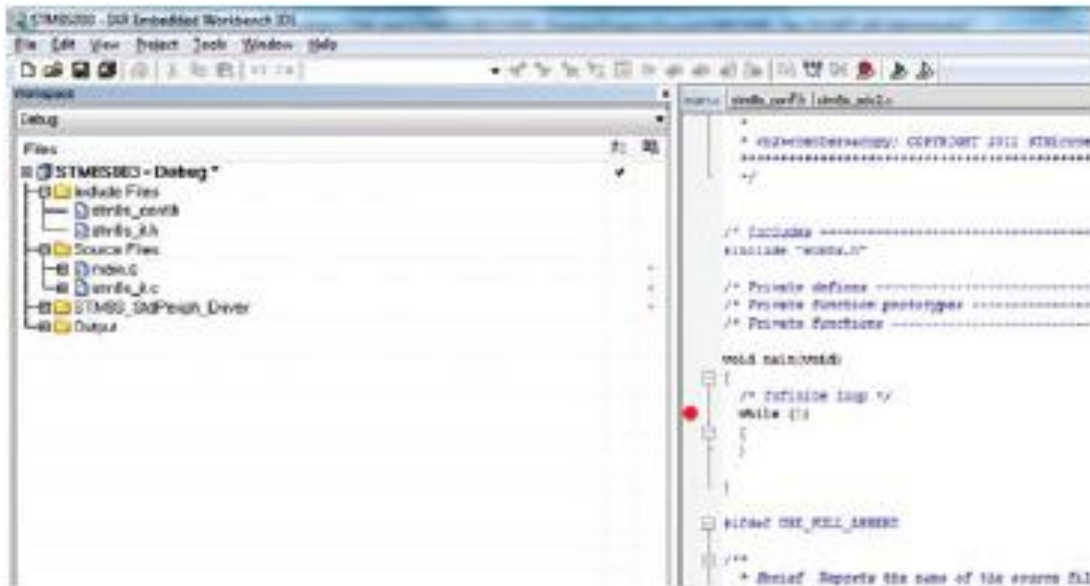


Рисунок 3.10 - Среда разработки IAR Embedded Workbench.

Пользовательские файлы выведены в отдельные папки и их можно быстро найти, чтобы открыть и что-либо изменить. Библиотека периферии выделена в отдельную папку и в нее можно смотреть только для ознакомления, так как все включенные в нее файлы имеют статус «только для чтения».

Опции, которые разрешают работать с библиотекой приведены на рисунке 3.11.

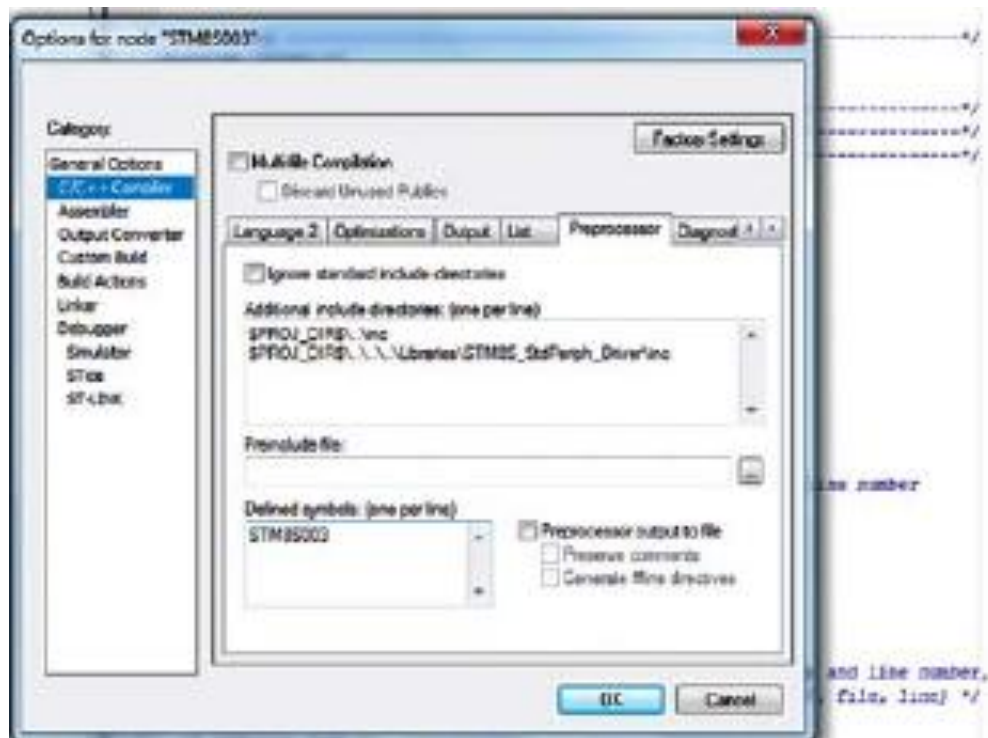


Рисунок 3.11 – Опции для работы с библиотекой.

## **Заключение**

В настоящее время распределенные системы сбора данных являются весьма перспективным направлением автоматизации различных систем и технологических процессов. Измерительные модули этих систем максимально приближены к объекту измерений, системы легко масштабируются и модифицируются. Поэтому разработка недорогих функциональных модулей для таких систем является весьма актуальной задачей.

Исследование принципов построения и технических характеристик прецизионных модулей ввода аналоговых сигналов показал, что имеется устойчивая тенденция по снижению их энергопотребления. Одним из направлений решения этой задачи является использование управляющих МК с пониженным напряжением питания. Однако это порождает проблему согласования уровней сигналов МК и разнообразной периферии, имеющей в общем случае различные уровни питающих напряжений.

Проведенный анализ предельно допустимых уровней входных и выходных сигналов управляющего МК системы сбора данных, цифровой и аналоговой периферии позволил сформулировать требования к интерфейсным схемам, решающим проблему согласования.

Анализ методов аналого-цифрового преобразования и технических параметров АЦП, реализующих эти методы, позволили выбрать в качестве основы канала А\Ц преобразования микросхему ADS8332, сочетающую высокую точность и высокое быстродействие. Для повышения точности измерений в устройстве использован внешний прецизионный источник опорного напряжения.

Обмен данными с модулями распределенной системы ADAM-4000 осуществляется через внешний универсальный RS-485 трансивер с интегрированной гальванической развязкой, работающий вместе с контроллером интерфейса SPI микроконвертора.

В процессе работы была разработана функциональная схема модуля, проведенный анализ возможных вариантов реализации преобразователей входных и выходных сигналов позволил определить схемные решения интерфейсных схем,

полностью удовлетворяющих требованиям технического задания. Оставшиеся неиспользованными линии порта ввода\вывода флэш - микроконтроллера MSP430F149 были использованы для реализации дополнительной 8 канальной схемы обмена данными с ТТЛ-КМОП периферией.

Из соображений обеспечения высокой отказоустойчивости и ремонтпригодности электрическая схема разработанного модуля разбита на две функционально законченные печатные платы – плату питания и гальванической защиты и плату микроконтроллера.

Проведенный расчет надежности показал, что разработанный модуль имеет наработку на отказ около 60 тысяч часов (более 6 лет непрерывной работы), что минимизировать затраты на его сервисное обслуживание.

В третьем разделе была разработана функциональная модель процесса изготовления платы микроконтроллера, с помощью САПР ПП DipTrace разработана его печатная плата и сгенерированы управляющие файлы для станков ЧПУ, используемых при ее изготовлении. Рассмотрены вопросы, связанные с программированием флэш-памяти микроконтроллера MSP430F149, проведен анализ средств его отладки и программирования.

### Список литературы

1. Cem Unsalan, H. Deniz Gurhan. Programmable Microcontrollers with Applications: MSP430 LaunchPad with CCS and Grace. McGraw-Hill, 2013.
2. John H. Davies. MSP430 Microcontroller Basics. Newnes, 2008. – 686с.
3. MSP430x13x, MSP430x14x, MSP430x14x1 mixed signal microcontroller// [www.microcontroller.ti.com](http://www.microcontroller.ti.com).
4. Бармин А. Модули ADAM: 15 лет успеха// [www.umnii-dom.ru/downloads/Advantech\\_ADAM\\_overview.pdf](http://www.umnii-dom.ru/downloads/Advantech_ADAM_overview.pdf).
5. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – М.: Госкомитет по стандартам, 2002. – 26 с.
6. Долин П.А. основы техники безопасности в электроустановках. М.: Энергоатомиздат.– 1984. – С.229.
7. Игнатов С. Изолированные трансиверы Texas Instruments для промышленных интерфейсов//Новости электроники, 2010. - №8. – С.6-9.
8. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование. Пер. с англ. – Техносфера, 2007. – 1016 с.
9. Компьютерный класс. Техника безопасности в компьютерном классе. Комплексное оснащение//[www.tocomplect.ru/oll-for-computer-class/computer-classroom-safety.html](http://www.tocomplect.ru/oll-for-computer-class/computer-classroom-safety.html).
10. Ланцов А.Л., Зворыкин Л.Н., Осипов И.Ф. Цифровые устройства на комплементарных МДП интегральных микросхемах. – М.: радио и связь, 1983. – 272 с.
11. Марков В., Абдуллаев О., Курочкин Р. «Оптоэлектронные интегральные микросхемы» – это просто, как оптопара//[www.gaw.ru](http://www.gaw.ru).
12. Модули измерительные ввода-вывода «RealLab» серии NL//[www.100best.ru](http://www.100best.ru).
13. Модули серии ADAM-3000 //[www.indpc.ru](http://www.indpc.ru).
14. Модули удаленного ввода-вывода серии ADAM-4000 //[www.empc.ru/e-store/ADAM4000](http://www.empc.ru/e-store/ADAM4000).

15. Панфилов Д.И., Иванов В.С. Датчики фирмы Motorola. – М.: ДОДЭКА, 2000. – 96 с.
16. Перковский Р.А. Применение интерфейса RS-485 в системах управления сварочным оборудованием. – Электронные компоненты, 2007, №5.
17. Распределенные системы сбора данных ADAM-5000  
[//www.indusystems.ru](http://www.indusystems.ru).
18. Серия ADAM-6000// [www.sea.com.ua](http://www.sea.com.ua).
19. Трамперт В. AVR-RISC микроконтроллеры: Пер. с нем. – К.: МК-Пресс,
20. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.