

Лабораторная работа №4

«Аналогово-цифровой преобразователь микроконтроллера STM32»

1 Цель работы

Ознакомиться с программными средствами работы с контроллером аналогово-цифрового преобразования в микроконтроллерах STM32.

2 Теоретические сведения

2.1 Аналогово-цифрового преобразователь

В зависимости от типа микроконтроллеров у STM32 может быть от одного до трех модулей АЦП. Микроконтроллер STM32F103RB содержит 2 однотипных АЦП со следующими основными характеристиками:

- АЦП последовательного преобразования;
- разрешение - 12 бит;
- 16 внешних аналоговых каналов, каналы встроенного датчика температуры и опорного напряжения;
- диапазон измерений от 0 до 3,3 В;
- режим самокалибровки;
- режимы однократных и непрерывных преобразований;
- запуск преобразований от внешних источников (таймеры, внешние прерывания) и программно.

В STM32 используется сложный автомат управления АЦП, который позволяет производить измерение аналоговых сигналов в автоматическом режиме.

Автомат управления модулем АЦП по заданной последовательности обрабатывает аналоговые каналы. По способу опроса каналы делятся на 2 группы: регулярные и инжектированные.

Регулярные каналы предназначены для обработки входных сигналов поочередно с определенной периодичностью.

При запуске опроса инжектированных каналов, обработка регулярных каналов приостанавливается. Инжектированные каналы опрашиваются между регулярными.

Оба типа каналов работают с общими аналоговыми входами микроконтроллера. Отличаются только приоритетом, последовательностью и способом инициализации опроса.

Для регулярных каналов формируется список последовательности работы. Согласно ему АЦП поочередно опрашивает эти каналы. Допускается до 16 регулярных преобразований. Один и тот же канал может опрашиваться несколько раз в одной последовательности. Сами последовательности могут вызываться циклически. Результаты преобразования регулярных каналов сохраняются в одном 16-разрядном регистре. Если до окончания следующего преобразования результат не был считан из регистра, он будет потерян.

У инжектированных каналов максимальное количество измерений в цикле составляет 4. Для сохранения результата преобразования каждого канала выделены отдельные 16-разрядные регистры.

АЦП содержит программно управляемый делитель частоты для получения рабочей тактовой частоты из тактового сигнала шины APB. Он позволяет делить частоту тактирования шины APB на 2, 4, 6 и 8. Значение коэффициента делителя задается в регистре RCC_CFGR. Для микроконтроллера STM32F103RB максимальная частота работы АЦП составляет 14 МГц.

Модуль АЦП имеет встроенный механизм калибровки. Калибровка уменьшает погрешности преобразования аналоговых сигналов. Во время калибровки вычисляются корректирующие коды, которые компенсируют погрешности аналоговых компонентов АЦП при дальнейшей работе. Рекомендуется производить калибровку один раз при каждой подаче

питания. Перед началом калибровки АЦП должен находиться во включенном состоянии.

Порядок действий при работе с АЦП следующий:

- задать конфигурацию АЦП;
- выполнить калибровку;
- определить каналы для преобразования;
- задать режим преобразования;
- запустить преобразование;
- определить, что преобразование закончилось, кроме режимов с непрерывным преобразованием;
- считать результат преобразования.

Режимы преобразования:

- однократное преобразование одного канала;
- однократное преобразование группы каналов;
- непрерывное преобразование одного канала;
- непрерывное преобразование группы каналов.

При установке бита CONT регистра ADC_CR2 включается непрерывное преобразование - после окончания преобразования группы каналов, будет автоматически запущено новое преобразование. При установке бита SCAN регистра ADC_CR1 разрешается режим сканирования - опрос группы каналов.

Режимы однократного преобразования могут быть запущены как для регулярных, так и для инжектированных каналов.

Режимы непрерывного преобразования устанавливаются только для регулярных каналов, для инжектированных каналов нет отдельного режима непрерывного преобразования, но существует возможность запускать преобразование инжектированных каналов после окончания преобразования регулярной группы - для этого необходимо установить бит JAUTO регистра ADC_CR1. Таким образом, в режиме непрерывного преобразования группы

каналов можно обрабатывать 1 регулярный и 4 инжектированных канала, получая значения преобразования в соответствующих регистрах.

В качестве источников запуска преобразования для регулярной группы каналов могут выступать:

- события таймеров: TIM1_CC1, TIM1_CC2, TIM1_CC3, TIM2_CC2, TIM3_TRGO, TIM4_CC4;
- линия внешнего прерывания №11;
- программный запуск (SWSTART).

В качестве источников запуска преобразования для инжектированной группы каналов могут выступать:

- события таймеров: TIM1_TRGO, TIM1_CC4, TIM2_TRGO, TIM2_CC1, TIM3_CC4, TIM4_TRGO;
- линия внешнего прерывания №15;
- программный запуск (JSWSTART).

Для АЦП формируются следующие виды прерываний:

- по завершению преобразования регулярной группы каналов - флаг EOCIE;
- по завершению преобразования инжектированной группы каналов - флаг JEOCIE;
- по срабатыванию аналогового сторожевого таймера - флаг AWDIE.

Для перевода результата преобразования в напряжение используется следующая формула:

$$V = \frac{DR \times V_{ref}}{2^{12}} \quad (1)$$

где:

- V - напряжение, В;
- DR - значение в регистре результата преобразования (ADC_DR или ADC_JDRx);
- Vref - значение опорного напряжения, В.

Структура АЦП микроконтроллера STM32F103RB включает следующие регистры:

- ADC_SR (смещение 0x00) - регистр статуса - определяет состояние АЦП;
- ADC_CR1 (смещение 0x04), ADC_CR2 (смещение 0x08) - регистры контроля - задают режим работы АЦП;
- ADC_SMPR1 (смещение 0x0C), ADC_SMPR2 (смещение 0x10) - регистры времени выборки - определяют время преобразования по каждому каналу;
- ADC_JOFR1 - ADC_JOFR4 (смещение 0x14-0x20) - регистры смещения данных инжектированных каналов;
- ADC_HTR (смещение 0x24) - регистр верхнего порогового значения для сторожевого таймера АЦП;
- ADC_LTR (смещение 0x28) - регистр нижнего порогового значения для сторожевого таймера АЦП;
- ADC_SQR1, ADC_SQR2, ADC_SQR3 (смещение 0x2C - 0x34) - регистры последовательности опроса регулярных каналов;
- ADC_JSQR (смещение 0x38) - регистр последовательности опроса инжектированных каналов;
- ADC_JDR1-ADC_JDR4 (смещение 0x3C - 0x48) - регистры результатов преобразования по каждому инжектированному каналу;
- ADC_DR (смещение 0x4C) - регистр результата преобразования для регулярных каналов.

Структура регистра статуса АЦП приведена на рис. 1.

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Reserved															
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Reserved											STRT	JSTRT	JEOC	EOC	AWD
Res.											rc_w0	rc_w0	rc_w0	rc_w0	rc_w0

Рис. 1

Регистр статуса включает следующие флаги:

- STRT - флаг запуска преобразования для группы регулярных канала;
- JSTRT - флаг запуска преобразования для группы инжектированных каналов;
- JEOS - флаг завершения преобразования для группы инжектированных каналов;
- EOS - флаг завершения преобразования для группы регулярных каналов;
- AWD - флаг выхода значения преобразования за пределы пороговых значений сторожевого таймера АЦП.

Структура контрольных регистров АЦП приведена на рис. 2 и 3.

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Reserved								AWDEN	JAWDEN	Reserved		DUALMOD[3:0]			
Res.								rw	rw	Res.		rw	rw	rw	rw
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
DISCNUM[2:0]			JDISCEN	DISCEN	JAUTO	AWDSGL	SCAN	JEOSIE	AWDIE	EOCIE	AWDCH[4:0]				
rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw

Рис. 2

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Reserved								TSVREFE	SWSTART	JSWSTART	EXTTRIG	EXTSEL[2:0]			Res.
Res.								rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
JEXTTRIG	JEXTSEL[2:0]			ALIGN	Reserved		DMA	Reserved				RSTCAL	CAL	CONT	ADON
rw	rw	rw	rw	rw	Res.		rw	Res.				rw	rw	rw	rw

Рис. 3

Основными флагами контрольных регистров являются:

- ADON - включение АЦП;
- CONT - включение режима непрерывного преобразования;

- CAL - включение калибровки АЦП;
- RSTCAL - сброс калибровки АЦП;
- DMA - работа АЦП в режиме DMA;
- ALIGN - задает выравнивание регистра данных;
- JEXTSEL - задает событие запуска преобразования для группы инжектированных каналов;
- JEXTTRIG - разрешение запуска преобразования для группы инжектированных каналов по внешнему событию;
- EXTSEL - задает событие запуска преобразования для группы регулярных каналов;
- EXTTRIG - разрешение запуска преобразования для группы регулярных каналов по внешнему событию;
- JSWSTART - программный запуск преобразования для группы инжектированных каналов;
- SWSTART - программный запуск преобразования для группы регулярных каналов;
- TSVREFE - разрешения работы датчика температуры и канала опорного напряжения;
- EOCIE - разрешение прерывания по флагу EOC;
- JEOCIE - разрешение прерывания по флагу JEOC;
- SCAN - включение режима сканирования;
- JAUTO - автоматическое преобразование группы инжектированных каналов по завершения преобразования группы регулярных каналов.

2.2 Контроль температуры и опорного напряжения

Схема подключения датчика температуры и сигнала опорного напряжения приведена на рис. 4.

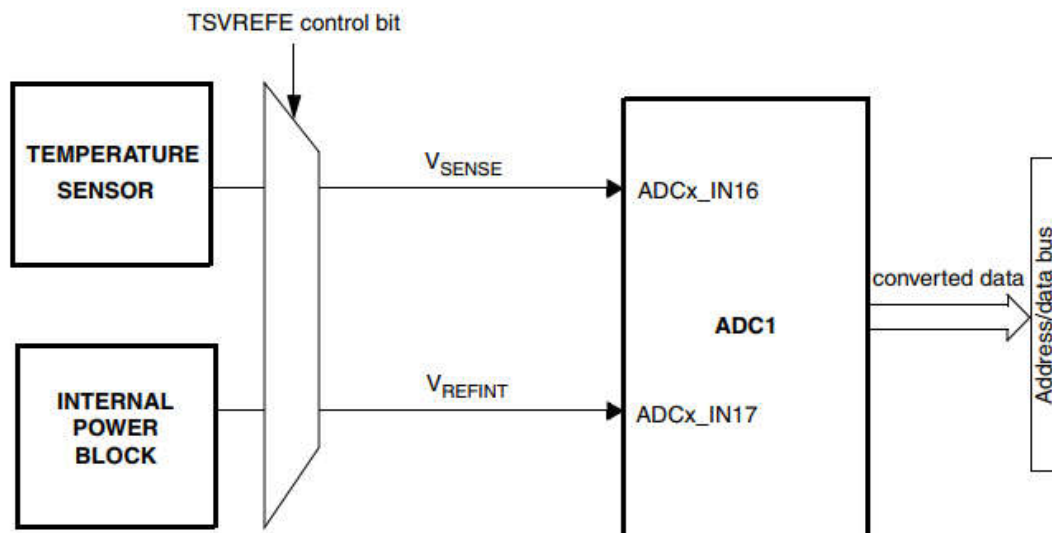


Рис. 4

Для включения преобразования каналов датчика температуры и опорного напряжения необходимо установить флаг TSVREFE в регистре ADC_CR2.

Для определения значения температуры по измеренному напряжению датчика используется формула:

$$T = \frac{(V_{25} - V_{SENSE})}{Avg_Slope} + 25 \quad (2)$$

где:

- T - температура, °C;
- V_{SENSE} - напряжение, полученное контроллером АЦП с датчика температуры, В;
- V_{25} - напряжение, соответствующее температуре +25°C, определяется электрическими характеристиками микроконтроллера, для STM32F103RB составляет 1,43 В;
- Avg_Slope - среднее приращение температуры, определяется электрическими характеристиками микроконтроллера, для STM32F103RB составляет 4,3 мВ / °C.

Температурный диапазон датчика от -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$, точность измерения составляет $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$.

Рекомендованное время преобразования для датчика температуры составляет 17,1 мкс.

2.3 Программирование контроллера аналогово-цифрового преобразования

Для управления АЦП средствами библиотеки CMSIS следует использовать программную структуру ADCx, где x - номер используемого АЦП (1 или 2). Структура определена в файле stm32f10x.h, где так же содержатся макроопределения для битовых масок, используемых при работе с регистрами устройства.

Для использования библиотеки SPL необходимые структуры данных и функции размещены в файлах stm32f10x_adc.h и stm32f10x_adc.c.

Для установки делителя тактовой частоты АЦП используется функция RCC_ADCCLKConfig.

Тактирование АЦП1 микроконтроллера осуществляется через шину APB2.

Перед началом конфигурирования АЦП рекомендуется выполнить деинициализацию - функция ADC_DeInit.

Настройка параметров АЦП выполняется через экземпляр структуры ADC_InitTypeDef. Через поля структуры устанавливаются режим работы, источник запуска преобразования, выравнивание данных и количество обрабатываемых регулярных каналов.

Инициализация АЦП выполняется функцией ADC_Init. По завершении инициализации необходимо запустить АЦП с использованием функции ADC_Cmd.

После запуска АЦП необходимо выполнить калибровку с использованием функций сброса и запуска калибровки - ADC_ResetCalibration и ADC_StartCalibration. Проверка статуса калибровки

выполняется `ADC_GetResetCalibrationStatus` и `ADC_GetCalibrationStatus` соответственно.

Включение преобразования каналов датчика температуры и опорного напряжения выполняется функцией `ADC_TempSensorVrefintCmd`.

Количество инжектированных каналов, подлежащих преобразованию, устанавливается функцией `ADC_InjectedSequencerLengthConfig`.

Для задания режима автоматического преобразования инжектированных каналов после выполнения преобразования регулярных каналов используется функция `ADC_AutoInjectedConvCmd`.

Конфигурация регулярных каналов выполняется функцией `ADC-RegularChannelConfig`, аналогичная функция для инжектированных каналов - `ADC_InjectedChannelConfig`. Ранги для регулярных каналов могут принимать значение от 1 до 16, для инжектированных каналов - от 1 до 4.

Программный запуск преобразования для регулярных каналов осуществляется функцией `ADC_SoftwareStartConvCmd`, для инжектированных каналов - функцией `ADC_SoftwareStartInjectedConvCmd`.

Для получения флагов завершения преобразования (EOC, JEOP) используется функция `ADC_GetFlagStatus`.

При установке режима сканирования с непрерывным преобразованием и установке автоматического преобразования инжектированных каналов, программный запуск преобразования регулярных каналов запускается один раз, после чего преобразования выполняются непрерывно путем обновления содержимого регистра DR для регулярного канала и регистров JDR для используемых инжектированных каналов.

Для чтения результатов преобразования регулярных каналов используется функция `ADC_GetConversionValue`, которая возвращает содержимое регистра DR. Для чтения результатов преобразования регулярных каналов используется функция `ADC_GetInjectedConversionValue`, которая возвращает содержимое регистра JDR соответствующего канала.

Для обработки прерываний АЦП используется процедура ADC1_2_IRQHandler, определенная в файле startup_stm32f10x_hd.s.

2.4 Формирование входного аналогового сигнала

Перечень входных каналов АЦП, доступных в симуляторе, можно получить с использованием командной строки отладчика и команды DIR VTREG. Для первого контроллера АЦП (ADC1) используются каналы ADC1_IN0-ADC1_IN15, канал датчика температуры - VTEMP1, для второго контроллера АЦП (ADC2) используются каналы ADC2_IN0-ADC2_IN15, канал датчика температуры - VTEMP2. Канал опорного напряжения VREFINT является общим для обоих АЦП.

Для добавления отображения канала в логическом анализаторе используется функция командной строки отладчика la с указанием имени добавляемого сигнала. Добавленный сигнал должен быть настроен на отображение в режимах Analog или State.

Использование сигнальной функции позволяет сформировать аналоговый сигнал заданной формы.

Для получения пилообразного сигнала используется функция следующего вида:

```
float volts, frequency, offset, val;
long i;
volts    = 2.0;           // амплитуда изменения сигнала
offset   = 0.2;           // минимальное значение напряжения
frequency = 1400;        // частота
i = 0;
steps = (100000 * (1/frequency));
while (1)
{
    val = (i % steps) / ((float) steps);
    ADC1_IN1 = (val * volts) + offset;
    i++;
    swatch (0.00001);      // изменение сигнала раз в 10 мкс
}
```

Результат работы функции пилообразного сигнала приведен на рис. 5.

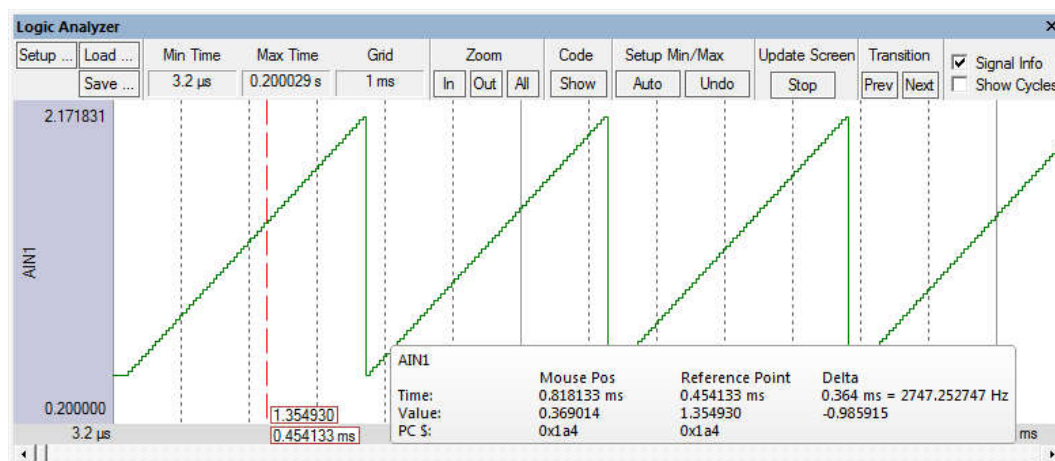


Рис. 5

Для получения синусоидального сигнала используется функция следующего вида:

```
float pi = 3.14159265;
val = __sin (frequency * (((float) STATES) / CLOCK) * 2 * pi);
ADC1_IN 2 = (val * volts) + offset;
swatch (0.00001);
```

Результат работы функции пилообразного сигнала приведен на рис. 6.

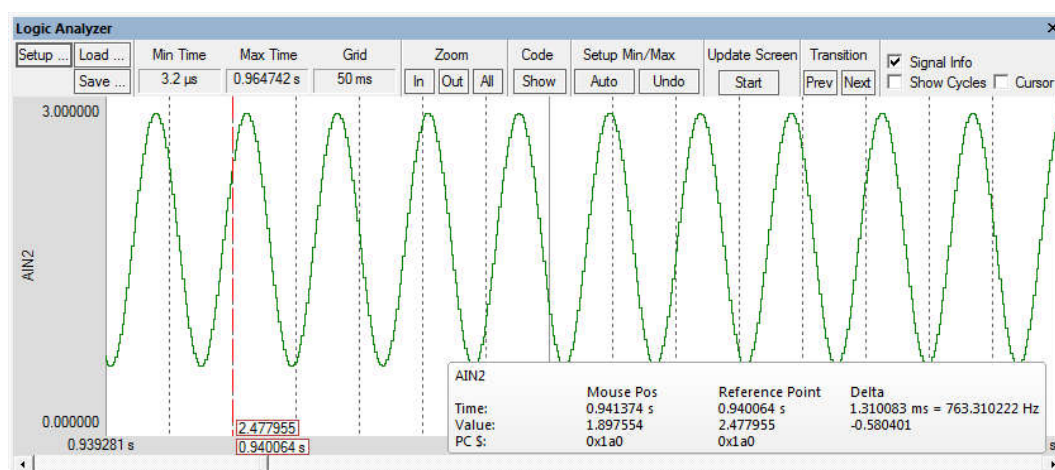


Рис. 6

Для получения шумоподобного сигнала используется функция следующего вида:

```
val = ((float) rand(0)) / 32767.0;  
ADC1_IN 3 = (val * volts) + offset;  
swatch (0.00001);
```

Результат работы функции шумоподобного сигнала приведен на рис. 7.

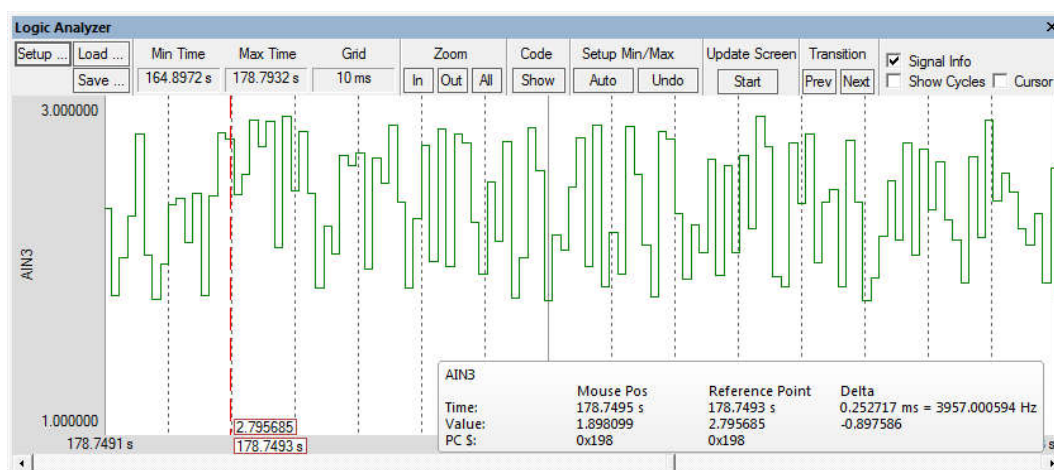


Рис. 7

Для отображения состояния устройства выберите используемый АЦП через вкладку «Peripherals-A/D Converter-ADCx», где x - номер используемого АЦП.

3 Задание

Разработать программу для микроконтроллера STM32F103RB, реализующую аналогово-цифровую обработку входного сигнала, показаний датчика температуры и канала опорного напряжения с использованием первого контроллера АЦП. Полученные значения выводить в терминал последовательного интерфейса один раз в секунду. Выводимая строка должна содержать:

- уровень входного сигнала, В;
- значение температуры, °C;

– уровень опорного напряжения, В.

Подачу входного аналогового сигнала и показаний датчика температуры реализовать через файл сценария с сигнальной функцией.

Параметры программы по вариантам приведены в табл. 1.

Таблица 1

Варианты заданий к лабораторной работе №4

Номер варианта	Номер канала АЦП	Закон изменения входного сигнала	Начальное значение температуры	Закон изменения температуры
1	1	Синусоидальный	+10°C	+0,2°C/с
2	2	Пилообразный	+16°C	+0,1°C/с
3	3	Шумоподобный	+5°C	+0,3°C/с
4	4	Пилообразный	+30°C	-0,1°C/с
5	5	Шумоподобный	+42°C	+0,1°C/с
6	6	Синусоидальный	-20°C	+0,5°C/с
7	7	Шумоподобный	0°C	+0,2°C/с
8	8	Пилообразный	+60°C	-0,2°C/с
9	9	Шумоподобный	+18°C	+0,1°C/с
10	10	Синусоидальный	-5°C	+0,3°C/с
11	11	Шумоподобный	-12°C	+0,4°C/с
12	12	Шумоподобный	+55°C	-0,3°C/с
13	13	Пилообразный	+20°C	+0,2°C/с
14	14	Синусоидальный	+8°C	+0,3°C/с
15	15	Пилообразный	+2°C	+0,4°C/с
16	2	Синусоидальный	+14°C	+0,1°C/с
17	4	Шумоподобный	+1°C	+0,5°C/с
18	6	Шумоподобный	-3°C	+0,3°C/с
19	8	Синусоидальный	-15°C	+0,5°C/с
20	0	Пилообразный	+35°C	+0,1°C/с

4 Порядок выполнения работы

4.1 Получить вариант задания у преподавателя.

4.2 Создать проект в среде Keil uVision5 для микроконтроллера

STM32F103RB.

4.3 Выбрать программные компоненты:

- CMSIS/Core,
- Device/Startup,
- Device/StdPeriph Drivers/ADC,
- Device/StdPeriph Drivers/Framework,
- Device/StdPeriph Drivers/GPIO,
- Device/StdPeriph Drivers/RCC;
- Device/StdPeriph Drivers/TIM;
- Device/StdPeriph Drivers/USART.

4.4 Выполнить настройку режима отладки для проекта.

4.5 Разработать файл сценария.

4.6 Разработать программу согласно задания.

4.7 Выполнить симуляцию разработанной программы.

4.8 Зафиксировать результаты функционирования программы:

- настройки аппаратных средств;
- содержимое терминала последовательного интерфейса;
- параметры сигналов.

4.9 Сделать выводы по проделанной работе и оформить отчет.

5 Содержание отчета

В отчете по результатам лабораторной работы должны быть приведены:

- используемые периферийные модули микроконтроллера;
- словесное описание алгоритма работы разработанной программы;
- текст файла сценария аналогового входного сигнала;
- текст разработанной программы;
- результаты работы разработанной программы в симуляторе;
- значения, выводимые в терминал последовательного интерфейса.

6 Контрольные вопросы

1. Какая максимальная частота работы АЦП микроконтроллера STM32F103RB?
2. Как выполняется установка частоты работы АЦП?
3. Сколько регулярных каналов может быть преобразовано в одной последовательности?
4. Сколько инжектированных каналов доступно в АЦП микроконтроллера STM32F103RB?
5. В каких режимах может работать АЦП микроконтроллера STM32?