

Аппаратное обеспечение IoT/CPS

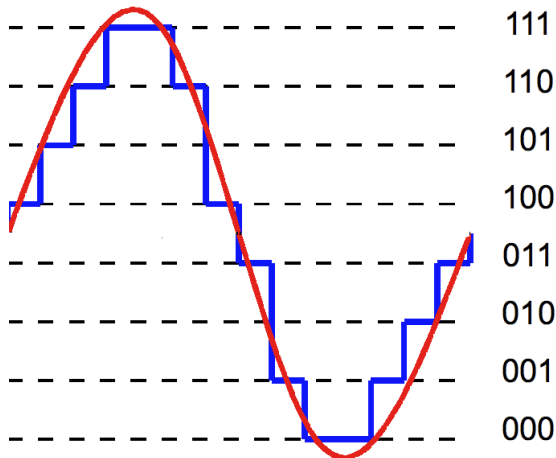
Лекция 5

А. А. Подшивалов
apodshivalov@miem.hse.ru

Аналого-цифровые преобразователи

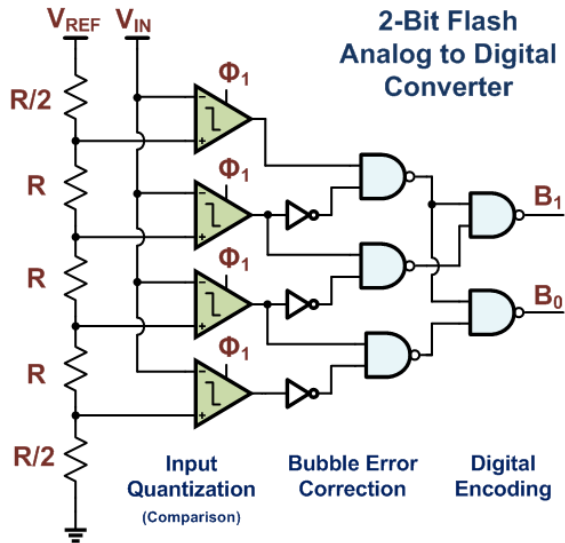
АЦП

- ▶ Измеряет «мгновенное» значение аналогового сигнала
- ▶ Преобразует значение в цифровой код
- ▶ Диапазон измерения — $0 \dots V_{ref}$ В
- ▶ Основные характеристики — разрядность и частота дискретизации



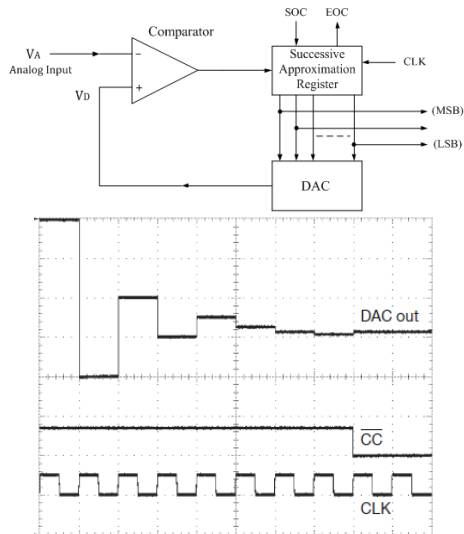
Flash ADC

- ▶ Сверхскоростные АЦП малой разрядности
- ▶ Для получения большой разрядности нужно очень большое количество компонентов
- ▶ Скорость от 10 млн. до 1 млрд. выборок в секунду
- ▶ Разрядность до 12 бит (обычно 8 бит)



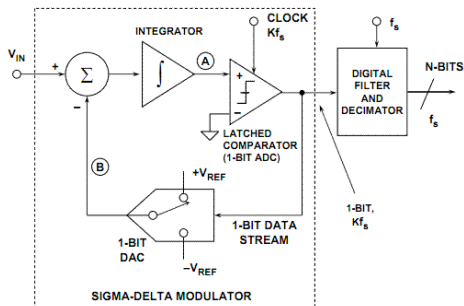
АЦП последовательного приближения (SAR ADC)

- ▶ Один из наиболее распространенных типов АЦП
- ▶ Примерно в 1000 раз медленнее АЦП прямого преобразования
- ▶ Скорость до 10 млн. выборок в секунду
- ▶ Разрядность до 20 бит (обычно 12–16 бит)
- ▶ Скорость можно увеличить, уменьшив разрядность
- ▶ Порядочно «угадываем» значение на входе



Дельта-сигма АЦП ($\Delta\Sigma$ ADC)

- ▶ Самый точный тип АЦП
- ▶ В 10 раз медленнее АЦП последовательного приближения
- ▶ Скорость до 1 млн. выборок в секунду
- ▶ Разрядность до 32 бит (обычно 16–24 бита)



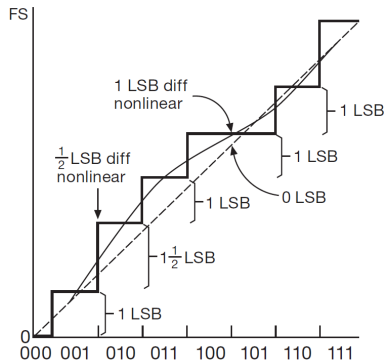
Практика применения

Точность преобразования АЦП

Паспортная разрядность мало о чём говорит

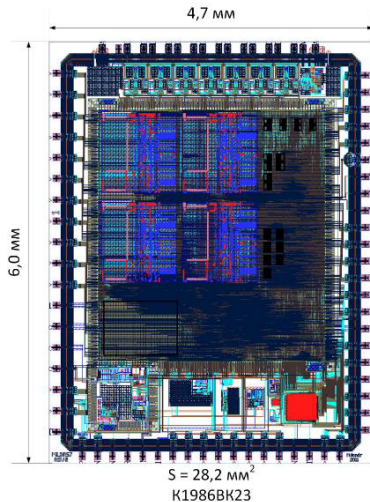
- ▶ Дифференциальная нелинейность (DNL)
- ▶ Потерянные значения (missing codes)
- ▶ Интегральная нелинейность (INL)
- ▶ Сдвиг нуля (offset)
- ▶ Коэффициент передачи (gain)
- ▶ Температурный коэффициент
- ▶ Шумы
- ▶ Точность источника V_{ref}

Эффективная разрядность — обычно около 80% паспортной



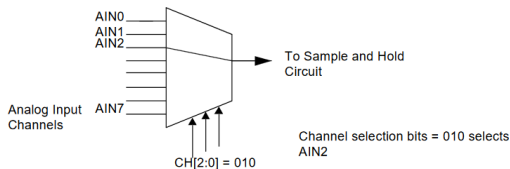
АЦП в микроконтроллере

- ▶ Обычно — АЦП последовательного приближения, 8-12 бит
- ▶ К АЦП могут быть подключены только некоторые входы
- ▶ Можно использовать внешние АЦП (подключаются по I²C, SPI, параллельным интерфейсам)
- ▶ Иногда бывают МК с более богатой аналоговой функциональностью (например, K1986BK025 — 7 дельта-сигма АЦП, 24 бита, до 16 000 отсчетов/с — специализированный МК для «умных» электросчетчиков)



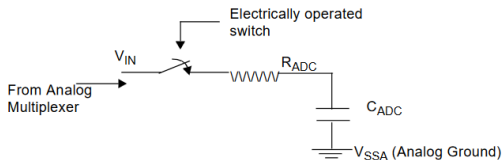
Многоканальные АЦП

- ▶ Обычная конфигурация АЦП в микроконтроллере — $1 \times N$, редко $2 \times N$
- ▶ На входе АЦП устанавливается мультиплексор
- ▶ Одновременные измерения на разных каналах невозможны



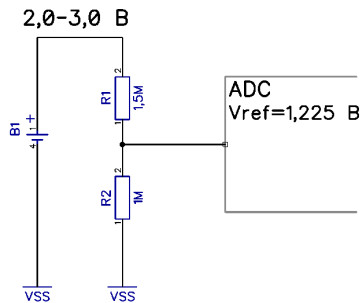
Структура входа АЦП

- ▶ Напряжение на входе АЦП последовательного преобразования должно быть постоянно все время измерения
- ▶ АЦП измеряет напряжение на внутреннем конденсаторе C_{ADC}
- ▶ Конденсатор подключается к входу АЦП на короткое время (менее 1 мкс)



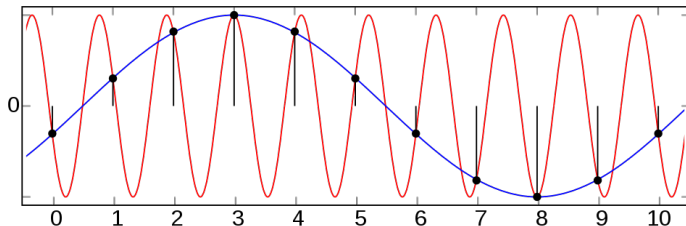
Измеряем напряжение батареи

- ▶ Типичное входное сопротивление АЦП — 1 МОм
- ▶ Идеальный АЦП
 - ▶ На входе делителя $U = 3$ В
 - ▶ На входе АЦП $\frac{U \times R_2}{R_1 + R_2} = 1,2$ В
- ▶ Реальный АЦП
 - ▶ На входе делителя $U = 3$ В
 - ▶ На входе АЦП $R'_2 = \frac{R_{ADC} \times R_2}{R_{ADC} + R_2} = 0,5$ МОм
 - ▶ На входе АЦП $\frac{U \times R'_2}{R_1 + R'_2} = 0,75$ В
- ▶ Можно использовать буферный усилитель
- ▶ Можно использовать напряжение батареи в качестве V_{ref} и измерить напряжение ИОН



Входной фильтр

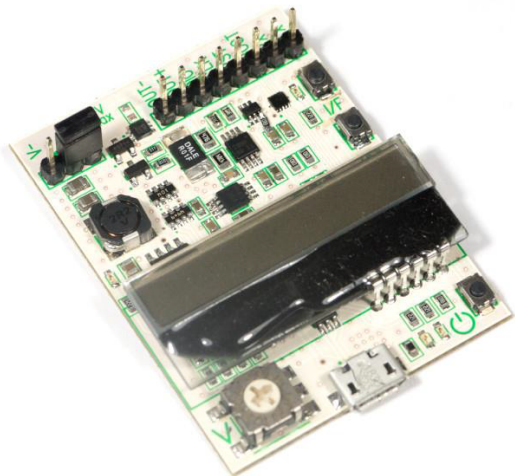
- ▶ Наложение спектров (aliasing)
- ▶ Теорема Котельникова-Найквиста-Шеннона — ширина спектра дискретизируемого сигнала должна быть вдвое меньше частоты дискретизации
- ▶ Практически всегда на входе АЦП ставится ФНЧ, хотя бы RC-цепочка



АЦП в микроконтроллере

- ▶ Настраиваем тактирование
- ▶ Настраиваем входы
- ▶ Запускаем преобразование (устанавливаем соответствующий бит в управляющем регистре)
- ▶ **ЖДЕМ (либо прерывания, либо установки флага)**
- ▶ Считываем полученное значение из регистра с данными

Что делать, когда данных много?



- ▶ Отладочный адаптер UMDK-EMB (или UMDK-RF)
- ▶ Частота измерений тока — 300 кГц
- ▶ Запуск преобразования по таймеру (без участия процессора)
- ▶ Использование DMA для передачи данных

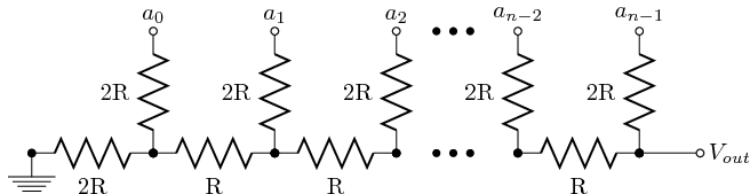
DMA — контроллер прямого доступа к памяти

- ▶ «Асинхронный метсру»
- ▶ Может копировать данные с одного адреса в памяти на другой без участия процессорного ядра
- ▶ Автоинкремент адресов источника и приемника (настраивается)
- ▶ Может управляться от периферии (UART, SPI, I2C, ADC, ...)
- ▶ Счетчик количества операций
- ▶ При достижении середины и конца буфера генерирует прерывание

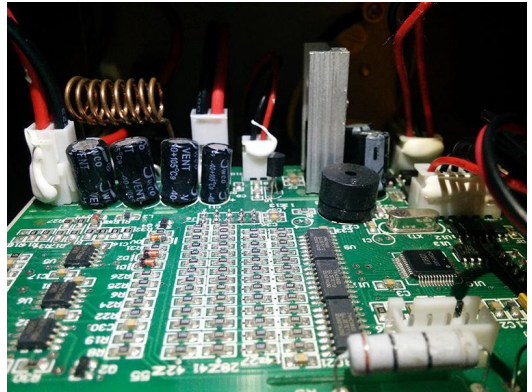
Цифро-аналоговое преобразование

R2R ЦАП (прямого преобразования)

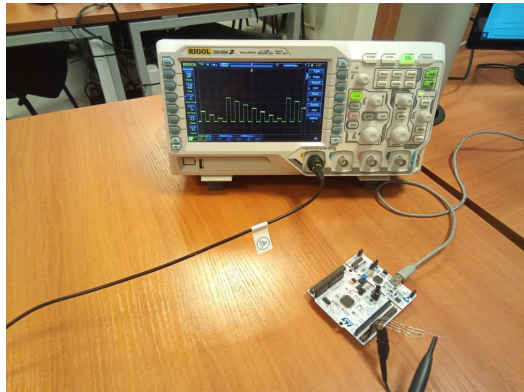
- ▶ Самый стабильный способ преобразования
- ▶ Самый быстрый способ преобразования
- ▶ Весьма точный способ преобразования (точность определяется точностью резисторов)
- ▶ Требуется большое число GPIO
- ▶ Требуется прецизионных резисторов
- ▶ Встроенные ЦАП обычно устроены похожим образом, но переключаются емкости или источники тока



R2R ЦАП — применение



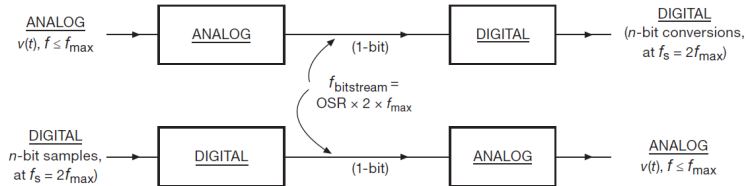
R2R ЦАП — применение



- ▶ 3-4 битный ЦАП из нескольких резисторов обычной (5–10%) точности на невостребованных GPIO можно применить для отладки
- ▶ Пример — переключение процессов в ОС

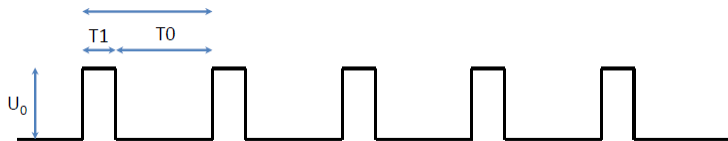
Сигма-дельта ЦАП ($\Sigma\Delta$ DAC)

- ▶ Обратный процесс по отношению к дельта-сигма АЦП
- ▶ 1-bit DAC в Super Audio CD



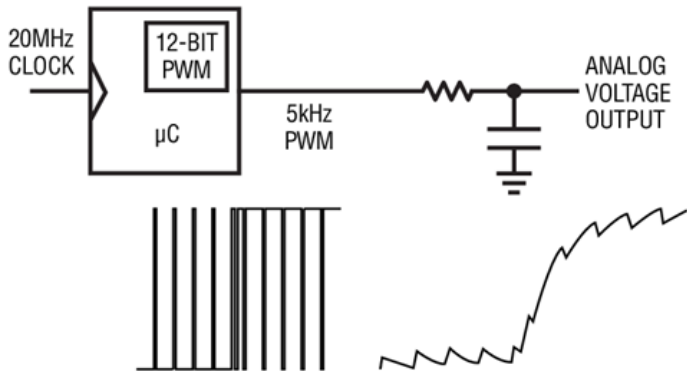
Широтно-импульсная модуляция

- ▶ Самый дешёвый способ получения «псевдоаналогового» сигнала
- ▶ Требует всего один GPIO
- ▶ Сквозность: $\frac{T_0}{T_0+T_1}$
- ▶ Коэффициент заполнения (duty cycle): $\frac{T_1}{T_0+T_1}$



Широтно-импульсная модуляция

- ▶ Прямоугольный сигнал можно сгладить, например, RC-цепочкой
- ▶ Больше постоянная цепочки — медленнее реакция выхода
- ▶ Меньше постоянная цепочки — больше пульсации на выходе



Широтно-импульсная модуляция

- ▶ ШИМ можно генерировать аппаратно от таймера микроконтроллера, безо всякого участия процессора
- ▶ Переполнение и достижение значения регистра сравнения аппаратного таймера меняют уровень на выводе МК
- ▶ Частота ШИМ определяется делителем таймера
- ▶ Записью в регистр сравнения меняем коэффициент заполнения

