

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры
(КУДР)

А.К. Пащенко, А.А. Бомбизов

ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Методические указания к выполнению
лабораторной и самостоятельной работы
по дисциплине «Микропроцессорные устройства»

УДК 004.42

ББК 32.973

П226

Рецензент:

Тренкаль Е.И., доцент кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры ТУСУР, канд. техн. наук

Пащенко Антон Константинович, Бомбизов Александр Александрович

П226 Цифро-аналоговый преобразователь. Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной работы по дисциплине «Микропроцессорные устройства» / А.К. Пащенко, А.А. Бомбизов. – Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2026. – 15 с.

Методическое пособие содержит краткую теорию по работе с цифро-аналоговым преобразователем и порядок выполнения лабораторной работы.

Одобрено на заседании каф. КУДР, протокол № 261 от 6 февраля 2026 г.

УДК 004.42

ББК 32.973

© Пащенко А.К., Бомбизов А.А., 2026

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2026

Содержание

1 Введение.....	4
2 Цифро-аналоговый преобразователь	4
2.1 Основные положения.....	4
2.2 Описание ЦАП в МК STM32F429	6
2.3 Регистры ЦАП	8
2.4 Аппаратное формирование сигналов.....	9
3 Отображение данных в графическом виде.....	10
4 Порядок выполнения работы	11
5 Контрольные вопросы	14
Список использованных источников	15

1 Введение

В основе современных цифровых управляющих устройств лежит непрерывный цикл: измерение физических величин, их обработка и формирование управляющих воздействий. Задачу первого этапа решает аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а заключительного – цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

ЦАП представляет собой интерфейс, через который вычислительное ядро воздействует на внешний мир. ЦАП трансформирует двоичные коды в точные аналоговые величины (напряжение, ток), которые позволяют управлять исполнительными устройствами, формировать сложные волновые формы, восстанавливать исходные формы сигналов после цифровой обработки.

Целью настоящей работы является освоение принципов работы цифро-аналогового преобразователя, при помощи которого микроконтроллер осуществляет генерацию аналоговых сигналов на своих выводах.

2 Цифро-аналоговый преобразователь

2.1 Основные положения

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) — устройство для преобразования цифрового (обычно двоичного) кода в аналоговый сигнал (ток, напряжение или заряд).

Аналогично АЦП, основными параметрами, характеризующими ЦАП являются:

- разрешение – минимальное изменение величины выходного сигнала, которое может быть сгенерировано ЦАП;
- разрядность – количество уровней аналогового сигнала, которое может воспроизвести ЦАП. Так, 8-битный ЦАП разбивает диапазон от 0 до V_{REF} на $2^8 = 256$ уровней аналогового сигнала;

– частота дискретизации – количество выборок аналогового сигнала, которое ЦАП может генерировать за секунду. Измеряется в герцах или выборках в секунду. В соответствии с теоремой Котельникова, для корректного воспроизведения аналогового сигнала из цифровой формы необходимо, чтобы частота дискретизации была не меньше удвоенной максимальной частоты в спектре сигнала.

Простейшим ЦАП является взвешивающий (делитель Кельвина), структура которого показана на рисунке 2.1. Каждому биту преобразуемого двоичного кода соответствует резистор или источник тока, подключенный на общую точку суммирования. Сила тока источника (или проводимость резистора) пропорциональна весу бита, которому он соответствует. N-разрядный ЦАП содержит 2^N одинаковых последовательно соединенных резисторов и 2^N ключей (обычно КМОП), по одному между каждым узлом цепи и выходом [1].

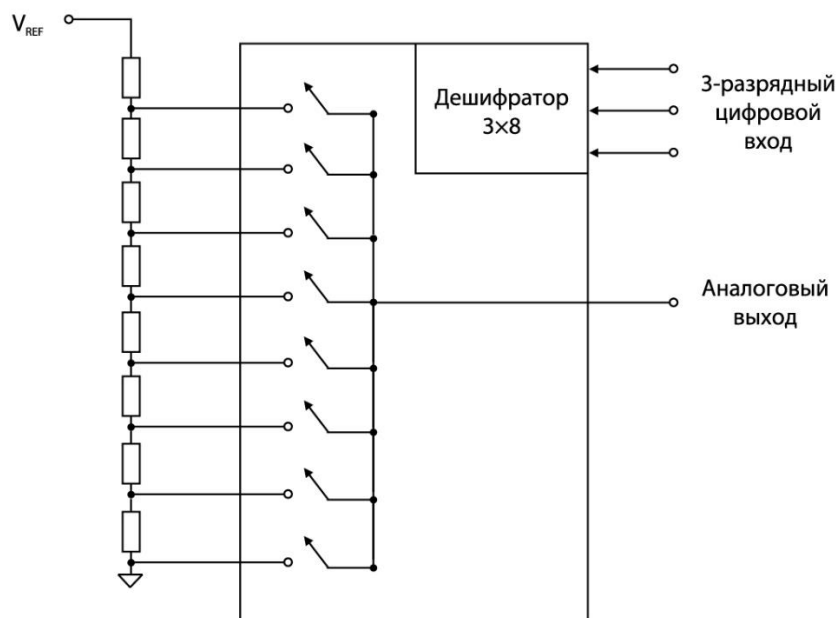


Рисунок 2.1 – Структура взвешивающего ЦАП

Изображенный на рисунке 2.1 ЦАП имеет трехразрядный цифровой вход, который характеризует разрядность ЦАП. Это значит, что диапазон

выходных значений может быть разбит на 8 частей. При $V_{REF} = 3 \text{ В}$ разрешение ЦАП составит: $3 \text{ В} / 8 = 0,375 \text{ В}$

Трёхразрядный дешифратор позволяет выбрать вывод из диапазона от 0 до 7. Таким образом, максимальное напряжение, которое может сгенерировать ЦАП составит: $0,375 \text{ В} \cdot 7 = 2,65 \text{ В}$

В микроконтроллерах STM32F4xx используется более сложный ЦАП, позволяющий генерировать уровень аналогового выходного напряжения от 0 до V_{REF} , если V_{REF} удовлетворяет условию:

$$1,8 \text{ В} \leq V_{REF} \leq V_{DDA},$$

где V_{DDA} – напряжение питания аналоговой части МК.

2.2 Описание ЦАП в МК STM32F429

Используемый в лабораторном курсе микроконтроллер включает в себя двухканальный ЦАП [2, раздел 14].

ЦАП характеризуется следующим набором параметров:

- настраиваемая разрядность 8 или 12 бит;
- диапазон значений выходного сигнала от 0 до V_{REF} ;
- генератор треугольных импульсов;
- генератор белого шума;
- формирование данных по событию.

На рисунке 2.2 приведена структурная схема ЦАП [1, рисунок 64].

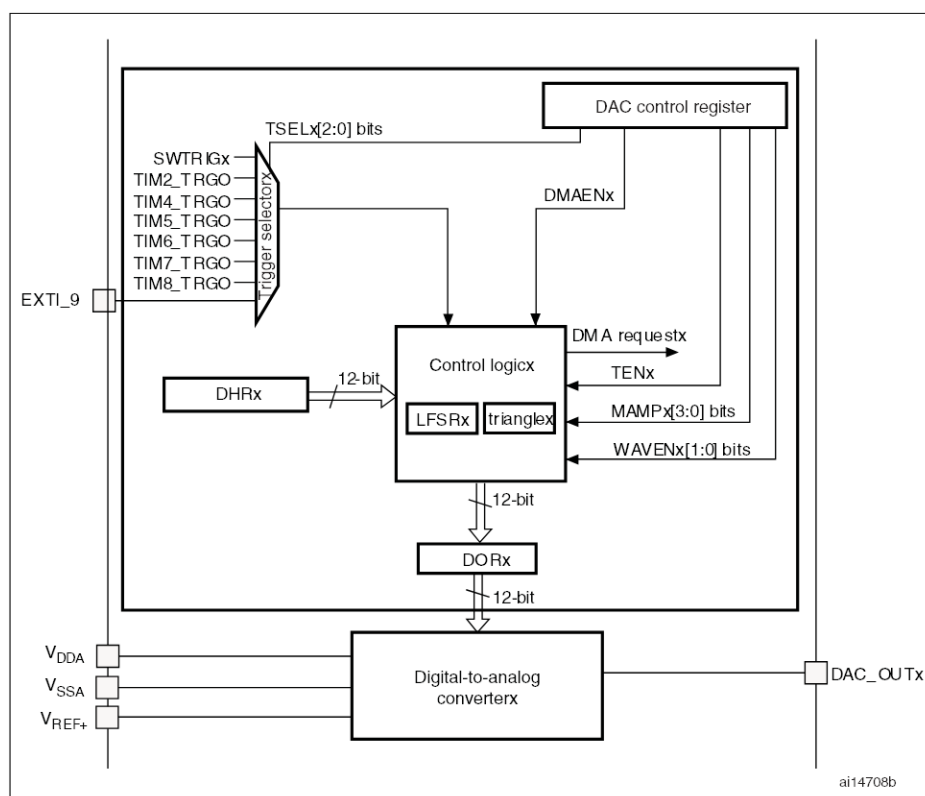


Рисунок 2.2 – Структурная схема ЦАП

В левом верхнем углу схемы (рисунок 2.2) изображены возможные источники сигнала запуска преобразования. В правом верхнем углу обозначен блок регистров настроек, данные от которого поступают в контроллер ЦАП. Слева по центру условно показан регистр входных данных DHRx. На основе его содержимого ЦАП формирует выходной сигнал. После поступления какого-либо сигнала запуска преобразования, ЦАП помещает данные из регистра DHRx в регистр DORx и затем в преобразователь цифрового сигнала в аналоговый. Результирующий аналоговый сигнал поступает на вывод DAC_OUTx.

Напряжение на выводе ЦАП можно рассчитать по формуле (2.1):

$$DAC_{OUT} = \frac{V_{REF} \times DOR}{2^n - 1} \quad (2.1)$$

где V_{REF} – опорное напряжение;

DOR – уровень сигнала в отсчетах ЦАП, от 0 до $(2^n - 1)$;

n – разрядность ЦАП.

2.3 Регистры ЦАП

Ниже приведено описание регистров, которые потребуются при выполнении лабораторной работы. Более подробно с регистрами ЦАП можно ознакомиться в документации на МК [2, раздел 14.5].

CR – основной регистр настроек:

- активация каналов ЦАП (EN1, EN2);
- активация буфера для каждого канала (BOFF1, BOFF2);
- активация обработки триггера запуска преобразования для каждого канала (TEN1, TEN2);
- выбор триггера запуска преобразования для каждого канала (TSEL1, TSEL2);
- активация генератора треугольного или шумового сигнала для каждого из каналов (WAVE1, WAVE2);
- установка значения амплитуды генератора сигналов каждого из каналов (MAMP1, MAMP2).

ЦАП имеет два выходных буфера, которые можно использовать для уменьшения выходного сопротивления и для прямого управления внешними нагрузками без необходимости добавления внешнего операционного усилителя. Выходной буфер каждого канала ЦАП можно включать и отключать с помощью соответствующего бита BOFFx в регистре DAC_CR [1, п. 14.3.2] (обратите внимание на описание бита BOFFx в документации).

Одной из особенностей настройки ЦАП на МК STM32F4xx является то, что при активации канала ЦАП в регистре CR, соответствующий вывод GPIO автоматически переключается в аналоговый режим.

SWTRIGR – регистр программного запуска преобразования:

- запуск преобразования первого канала (SWTRIG1);
- запуск преобразования второго канала (SWTRIG2).

DHR12R1 – регистр загрузки значения амплитуды для первого канала.

DHR12R2 – регистр загрузки значения амплитуды для второго канала.

DOR1 – регистр выходных данных первого канала ЦАП.

DOR2 – регистр выходных данных второго канала ЦАП.

2.4 Аппаратное формирование сигналов

Встроенный в МК ЦАП позволяет на аппаратном уровне генерировать два вида сигналов: шум и треугольник. При этом, значение в регистре DHRx будет использоваться в качестве смещения относительно нуля минимального уровня аналогового сигнала.

Генератор шума.

Для генерации псевдошума переменной амплитуды доступен LFSR (регистр сдвига с линейной обратной связью). Генерация шума ЦАП задается путем установки WAVEx[1:0] на «01». Предварительно загруженное значение в LFSR — 0xAAA. Этот регистр обновляется через три такта APB1 после каждого события запуска в соответствии с определенным алгоритмом расчета [2, п. 14.3.8].

Генератор треугольных импульсов.

ЦАП может добавить треугольный сигнал малой амплитуды к постоянному или медленно меняющемуся сигналу. Генерация треугольных сигналов ЦАП выбирается путем установки WAVEx[1:0] на «10». Амплитуда настраивается битами MAMPx[3:0] в регистре DAC_CR. Внутренний счетчик стороны треугольника увеличивается спустя три такта APB1 после каждого события запуска. Значение этого счетчика затем добавляется в регистр DAC_DHRx без переполнения, а сумма сохраняется в регистре DAC_DORx. Счетчик стороны треугольника увеличивается до тех пор, пока не достигнет максимальной амплитуды, определенной битами MAMPx[3:0]. Как только настроенная амплитуда достигнута, счетчик уменьшается до 0, затем снова увеличивается и так далее [2, п. 14.3.9].

3 Отображение данных в графическом виде

Формирование графика начинается с указания параметров областей построения, таких как начальные координаты, размеры и цвет фона.

Для удобства хранения информации о области графика имеется структура `osc_bg_t`.

```
typedef struct{
    u16 x_start;
    u16 y_start;
    u16 width;
    u16 height;
    u16 bg_color;
}osc_bg_t;
```

Где `x_start` – начало графической области по оси X;

`y_start` – начало графической области по оси Y;

`width` – ширина графической области;

`height` – высота графической области;

`bg_color` – цвет фона графической области;

Для построения графической области предусмотрено функция

```
void OSC_FillOscillatorBackground(const osc_bg_t *osc_bg);
```

которая принимает в качестве параметра указатель на структуру типа `osc_bg_t`.

Для отображения и ограничения минимального и максимального значения на графике по оси Y (амплитуда), предусмотрена функция

```
void OSC_DrawValueMinMax( const osc_bg_t *osc_bg, u16 bg_color);
```

которая принимает следующие параметры:

`osc_bg` – указатель на структуру типа `osc_bg_t`;

`bg_color` – значение цвета фона текста в кодировке RGB565.

Для изменения пределов значений по оси Y предусмотрены две функции:

```
void OSC_SetValueMinMax_Default();
```

```
void OSC_SetValueMinMax_MAMP2();
```

Функция `OSC_SetValueMinMax_Default` устанавливает пределы оси Y от 0 до 3000 мВ.

Функция `OSC_SetValueMinMax_MAMP2` устанавливает пределы оси Y используя значение из регистра DHR12R2 и состояния битов MAMP2 из регистра CR.

Для добавления нового значения на графическую область предусмотрена функция

```
void OSC_DrawValue(const osc_bg_t *osc_bg, s16 value);
```

которая принимает два параметра:

`osc_bg` – указатель на структуру типа `osc_bg_t`;

`value` – значение, которое нужно добавить на график.

4 Порядок выполнения работы

В ходе данной работы будут освоены следующие разделы: 1) освоение работы с аналого-цифровым преобразователем; 2) вывод текстовой информации на дисплей.

1. Изучите предложенный в п. 2 и п. 3 теоретический материал.
2. Откройте проект-заготовку для лабораторной работы.
3. По аналогии с предыдущей работой:
 - а. сконфигурируйте дисплей и АЦП для работы с седьмым каналом;
 - б. добавьте обработку и вывод оцифрованного значения седьмого канала АЦП на экран в основной цикл `while(1)`.

Конфигурация ЦАП.

4. Определите букву и номер порта GPIO к которому подключен второй канал ЦАП (DAC) [3, таблица 10].
5. Активируйте тактирование и настройте в аналоговый режим порт МК второго канала ЦАП.
6. Определите шину тактирования DAC и активируйте его тактирование.
7. Активируйте второй канал ЦАП в соответствующем регистре.
8. Активируйте буфер второго канала в соответствующем регистре ЦАП.

Простая генерация сигнала.

9. Рассчитайте по формуле (2.1) значение выходного регистра ЦАП для напряжения 0,5 В.
10. Запишите полученный результат в регистр загрузки значения амплитуды для второго канала ЦАП.
11. Выполните сборку и загрузку ПО на контроллер.
12. Соедините второй канал ЦАП с седьмым каналом АЦП при помощи провода или джампера. На дисплее должно отобразиться значение, близкое к 0,5 В.

Запуск преобразования по триггеру.

13. Разрешите обработку триггеров для второго канала ЦАП установив необходимый бит в соответствующем регистре.
14. Установите программный триггер для второго канала в соответствующем регистре ЦАП.
15. Рассчитайте по формуле (2.1) значение выходного регистра ЦАП для напряжения 1,0 В.
16. Запишите полученный результат в регистр загрузки значения амплитуды для второго канала ЦАП.
17. Выполните сборку и загрузку ПО на контроллер. Сравните отображаемый результат с ранее полученным.
18. Установите бит программного триггера запуска преобразования для второго канала.
19. Выполните сборку и загрузку ПО на контроллер. Сравните отображаемый результат с ранее полученным.

Отображение данных на графике.

20. Создайте переменную типа `osc_bg_t`.
21. Заполните поля созданной переменной, исходя из описания структуры `osc_bg_t` из раздела 3.
22. Постройте область отображения графика используя функцию `OSC_FillOscillatorBackground`.

23. Задайте пределы измерения по умолчанию для оси Y.
24. Добавьте на график отображение пределов оси Y при помощи `OSC_DrawValueMinMax`.
25. В основном цикле `while(1)`, поле функции `UB_Font_DrawString` выполните вызов функции `OSC_DrawValue`.
26. Измените задержку в функции `UB_Systick_Pause_ms` на 20 мс.
27. Выполните сборку и загрузку ПО на контроллер. Удостоверьтесь, что на экране отображается график.

Генерация белого шума (случайных значений).

28. Установите в регистре настроек ЦАП необходимые биты для активации генерации белого шума.
29. Установите значение амплитуды для генератора белого шума [2, п. 14.5.1, описание битов MAMP2].
30. Задайте пределы измерения для оси Y при помощи функции `OSC_SetValueMinMax_MAMP2`.
31. Добавьте на график отображение пределов оси Y при помощи `OSC_DrawValueMinMax`.
32. Внутри основного цикла `while(1)`, перед функцией `UB_Systick_Pause_ms`, выполните установку бита программного запуска преобразования для второго канала.
33. Выполните сборку и загрузку ПО на контроллер. Значение на экране должны изменяться в случайном порядке.

Генератор треугольных импульсов.

34. Вместо генератора белого шума установите в регистре настроек ЦАП необходимые биты для активации генератора треугольного сигнала.
35. Установите значение амплитуды для генератора треугольного сигнала [2, п. 14.5.1, описание битов MAMP2].
36. Выполните сборку и загрузку ПО на контроллер. Значение на экране должно линейно возрастать, а затем убывать.

37. Оформите отчет, содержащий титульный лист, введение, ход выполнения работы, ответы на контрольные вопросы и выводы.
38. Защитите отчет у преподавателя.

5 Контрольные вопросы

- 5.1 Для чего нужен ЦАП?
- 5.2 Перечислите основные параметры ЦАП.
- 5.3 Какие сигналы ЦАП может генерировать на аппаратном уровне?
- 5.4 Как активировать генерацию треугольных импульсов?
- 5.5 В каком регистре задается значение амплитуды для треугольного сигнала?

Список использованных источников

- 1 ЦАП. Так ли все просто? / Время электроники. – URL: <https://russianelectronics.ru/czap-tak-li-vse-prosto/> (дата обращения: 25.11.2025)
- 2 RM0090. Reference manual. STM32F405/415, STM32F407/417, STM32F427/437 and STM32F429/439 advanced ARM®-based 32-bit MCUs.– URL: www.st.com/resource/en/reference_manual/DM00031020.pdf (дата обращения: 17.11.2025);
- 3 Datasheet. STM32F427xx/ STM32F429xx ARM Cortex-M4 32b MCU+FPU, 225DMIPS, up to 2MB Flash/256+4KB RAM, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 20 comm. interfaces, camera & LCD-TFT. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/691/DOC034691022.pdf> (дата обращения: 18.11.2025)