ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «Ай-Тор»

(ООО «Ай-Тор»)

Утв. МЦАВ.20.00.00.10 ДМ5 v1.00 – ЛУ

Программное обеспечение ADC/DAC

Описание программы

Версия ПО 1.00

Номер редакции 1.0

На 25 листах

Екатеринбург, 2026

АННОТАЦИЯ

Программный комплекс ADC/DAC (Analog-to-Digital Converter / Digital-to-Analog Converter) предназначен для организации оптического канала передачи измерительных данных в системах учёта электроэнергии высоковольтных линий.

Комплекс представляет собой встроенное программное обеспечение, состоящее из двух взаимосвязанных модулей:

- **модуля оптического передатчика (ADC)** — для оцифровки аналоговых сигналов и их передачи по оптическому интерфейсу;
- **модуля оптического приёмника (DAC)** — для приёма цифровых данных, их декодирования, цифро-аналогового преобразования и анализа параметров сигнала.

Модули функционируют на базе микроконтроллеров STM32F0xx и STM32F3xx соответственно, работают исключительно в составе единого комплекса и не имеют самостоятельного практического применения.

В документе приведены:

- общие сведения о программном комплексе;
- функциональное назначение;
- описание логической структуры и алгоритмов работы;
- описание данных и функций;
- сведения о взаимодействии с внешними устройствами;
- обработка ошибок;
- требования к надёжности;
- особенности реализации.

Настоящий документ составлен в соответствии с:

- ГОСТ 19.402–79 ЕСПД. Описание программы;
- ГОСТ 19.105–78 ЕСПД. Общие требования к программным документам;
- ГОСТ 19.106–78 ЕСПД. Общие требования к программным документам, выполненным печатным способом;

- ГОСТ 19.701–90 ЕСПД. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Перечень принятых сокращений 6
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ 7
1.1. Обозначение и наименование программного комплекса 7
1.2. Аппаратное обеспечение, необходимое для функционирования 7
1.3. Программное обеспечение, необходимое для компилирования 8
1.4. Языки программирования, на которых написана программа 8
2. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ 9
2.1. Назначение программного комплекса 9
2.2. Сведения о функциональных ограничениях на применение 9
3. РАБОТА ПРОГРАММЫ 10
3.1. Основные режимы работы модуля ADC 10
3.2. Основные режимы работы модуля DAC 10
3.3. Алгоритм работы программного комплекса 11
4. ОПИСАНИЕ ДАННЫХ 13
4.1. Глобальные переменные 13
4.2. Константы 14
4.3. Структура пакетов данных 14
5. ОПИСАНИЕ ФУНКЦИЙ 16
5.1. Основные функции модуля ADC 16
5.2. Основные функции модуля DAC 16
5.3. Вспомогательные функции 17
6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВНЕШНИМИ УСТРОЙСТВАМИ 18
6.1. Интерфейс ModBus RTU 18
6.2. Оптический интерфейс 19
6.3. Интерфейс SPI 20
6.4. Интерфейс 1-Wire (модуль ADC) 20

6.5. Память EEPROM I2C (модуль DAC) 21
7. ОБРАБОТКА ОШИБОК 22
7.1. Флаги состояния 22
7.2. Механизмы восстановления 22
8. ТРЕБОВАНИЯ К НАДЁЖНОСТИ 23
9. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ 24
9.1. Оптимизация производительности 24
9.2. Безопасность и надёжность 24
9.3. Диагностика и отладка 24
ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ 25

Перечень принятых сокращений

ADC Analog-to-Digital Converter (аналого-цифровой преобразователь)

DAC Digital-to-Analog Converter (цифро-аналоговый преобразователь)

SPI Serial Peripheral Interface (последовательный периферийный интерфейс)

UART Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (универсальный асинхронный приёмопередатчик)

IWDG Independent Watchdog (независимый сторожевой таймер)

DMA Direct Memory Access (прямой доступ к памяти)

CRC Cyclic Redundancy Check (циклический избыточный код)

ПО Программное обеспечение

ВПО Встроенное программное обеспечение

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Обозначение и наименование программного комплекса

Обозначение программного комплекса: МЦАВ.20.00.00.10ДМ5 v1.00.

Полное наименование: Программный комплекс оптической передачи измерительных данных ADC/DAC.

Состав комплекса:

- Модуль оптического передатчика (ADC): МЦАВ.20.00.01.10ДМ5 v1.00;
- Модуль оптического приёмника (DAC): МЦАВ.20.00.02.10ДМ5 v1.00.

Краткое наименование: ПО ADC/DAC.

1.2. Аппаратное обеспечение, необходимое для функционирования

Модуль ADC:

- Микроконтроллер: STM32F0xx (ядро Cortex-M0);
- Тактовая частота: 48 МГц;
- Память: Flash ≥ 32 КБ, RAM ≥ 4 КБ;
- Периферия:
  - SPI1 — для связи с внешним 16-битным АЦП (TPC5161);
  - USART1 — оптический передатчик (2 Мбит/с);
  - USART2 — интерфейс ModBus RTU (115200 бит/с);
  - TIM3 — ШИМ и таймер опроса АЦП;
  - TIM14, TIM17 — вспомогательные таймеры;
  - IWDG — сторожевой таймер;
  - GPIO — для режима настройки и интерфейса 1-Wire.

Модуль DAC:

- Микроконтроллер: STM32F3xx (ядро Cortex-M4);
- Тактовая частота: 72 МГц;
- Память: Flash ≥ 32 КБ, RAM ≥ 8 КБ;
- Периферия:
    - USART1 — интерфейс ModBus RTU (115200 бит/с) с управлением DE;
    - USART2 — оптический приёмник (2 Мбит/с);
    - SPI1 — выходной интерфейс для управления внешним 16-битным ЦАП;
    - I2C1 — энергонезависимая память EEPROM (24xx серии);
    - TIM6, TIM7, TIM17, TIM18 — таймеры;
    - IWDG — сторожевой таймер;
    - CRC — аппаратный расчёт контрольных сумм.

1.3. Программное обеспечение, необходимое для компилирования

- Компилятор: ARM GCC или аналогичный;
- Библиотеки:
    - HAL/LL библиотеки STM32;
    - my_modbus (ModBus RTU);
    - 1-Wire (my_ow);
    - FreeModbus (модуль DAC);
- Среда разработки: STM32CubeIDE или аналогичная.

1.4. Языки программирования, на которых написана программа

Программный комплекс написан на объектно-ориентированном языке C.

2. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ

2.1. Назначение программного комплекса

Программный комплекс ADC/DAC предназначен для измерения аналоговых сигналов с последующей оцифровкой, передачей по оптическому каналу, приёмом, декодированием, цифро-аналоговым преобразованием и анализом параметров сигнала.

Модуль ADC обеспечивает:

- инициализацию и управление внешним 16-битным АЦП через SPI;
- оцифровку аналоговых сигналов с заданной частотой;
- цифровую фильтрацию (скользящее среднее);
- формирование пакетов данных и передачу по оптическому интерфейсу;
- чтение датчиков температуры по 1-Wire.

Модуль DAC обеспечивает:

- приём данных по оптическому каналу;
- декодирование пакетов с проверкой CRC;
- анализ сигнала (амплитуда, частота, форма);
- управление внешним 16-битным ЦАП через SPI;
- управление исполнительными реле;
- обслуживание запросов ModBus.

2.2. Сведения о функциональных ограничениях на применение

Программный комплекс работает только с совместимыми модулями оптических передатчиков и приёмников производства ООО «Ай-Тор». Модули не предназначены для самостоятельного использования и функционируют исключительно в составе единого комплекса.

3. РАБОТА ПРОГРАММЫ

3.1. Основные режимы работы модуля ADC

Программа поддерживает два режима, определяемые состоянием пина MODE:

Рабочий режим (MODE = 1):

- изменение амплитуды аналогового сигнала;
- опрос датчиков температуры DS18x20;
- формирование выходного пакета данных;
- передача данных по USART1 (оптический канал).

Режим настройки (MODE = 0):

- активация ModBus RTU slave;
- настройка параметров через регистры хранения:
    - коэффициент масштабирования;
    - фаза сигнала;
- сохранение параметров во Flash-память.

3.2. Основные режимы работы модуля DAC

Нормальный режим:

- приём данных по оптическому каналу (USART2);
- декодирование пакетов с проверкой CRC;
- анализ аналогового сигнала (амплитуда, частота);
- управление реле при наличии корректного сигнала;
- обслуживание запросов ModBus RTU.

Режим конфигурации:

- активация по нажатию кнопки или паролю в регистрах;
- настройка параметров через ModBus:
    - коэффициент масштабирования (dac_koeff);
    - фаза (RX_PHASE);

    - адрес ModBus (MB_ADDR);
    - номер БОИ (BOI_NUM);
- сохранение параметров в EEPROM.

3.3. Алгоритм работы программного комплекса

Модуль ADC:

1. Инициализация HAL и системы тактирования.
2. Вычисление CRC уникального ID микроконтроллера.
3. Чтение параметров из Flash-памяти.
4. Проверка корректности чтения Flash (при ошибке — установка флага F_FLASH_ERR).
5. Определение режима работы по пину MODE.
6. Инициализация периферии в зависимости от режима:
    - MODE = 1: инициализация 1-Wire, запуск измерений температуры;
    - MODE = 0: инициализация ModBus.
7. Запуск основного цикла:
    - обновление сторожевого таймера;
    - проверка условий обработки;
    - при готовности данных АЦП: вычисление амплитуды, проверка перегрузки (установка/сброс F_ADC_OVR), формирование выходного пакета;
    - по таймауту температуры: чтение DS18x20, обновление данных;
    - в режиме настройки: проверка регистров ModBus, сохранение изменений в Flash;
    - передача сформированного пакета по USART1.

Модуль DAC:

1. Инициализация HAL и системы тактирования.
2. Вычисление CRC уникального ID микроконтроллера.

3. Определение типа устройства по пину M_TYPE.
4. Чтение параметров из EEPROM.
5. Инициализация ModBus RTU с адресом из EEPROM.
6. Настройка DMA для приёма оптических данных по USART2.
7. Запуск сторожевого таймера.
8. Запуск основного цикла:
    - обновление IWDG;
    - проверка условий обработки;
    - при готовности данных: анализ сигнала, вычисление амплитуды и частоты, обновление регистров;
    - при приёме пакета: декодирование оптических данных, проверка CRC, извлечение данных, обновление регистров передатчика;
    - в режиме конфигурации: проверка регистров ModBus, при изменении параметров — сохранение в EEPROM;
    - управление реле на основе наличия корректного сигнала;
    - опрос ModBus.

Взаимодействие модулей:

- Модуль ADC формирует пакет данных (вспомогательный и основной) и передаёт по оптическому каналу USART1 (TX) со скоростью 2 Мбит/с.
- Модуль DAC принимает данные по USART2 (RX) со скоростью 2 Мбит/с, осуществляет поиск синхробайтов 0xAA, проверяет CRC и извлекает данные.
- При отсутствии входного сигнала в течение заданного таймаута устанавливается флаг F_E_NO_INPUT и реле отключается.

4. ОПИСАНИЕ ДАННЫХ

4.1. Глобальные переменные

Модуль ADC:

Переменная	Тип	Назначение
PSW_REG	uint16_t	Регистр флагов состояния программы
multic	float32_t	Коэффициент масштабирования (по умолчанию 1.0)
phase	uint16_t	Фаза сигнала (по умолчанию 184)
dev_settings[16]	uint16_t	Буфер для хранения параметров во Flash
reg_holdings[16]	uint16_t	Буфер регистров хранения ModBus
val_buff[4]	uint16_t	Буфер значений АЦП
ds_temp[2]	uint8_t	Температура с датчика DS18x20
out_arr[16]	uint8_t	Вспомогательный пакет данных
tx_buff[4]	uint8_t	Основной пакет данных

Модуль DAC:

Переменная	Тип	Назначение
PSW_REG	uint32_t	Регистр флагов состояния программы
dac_koeff[2]	float	Коэффициенты масштабирования [0] и резерв
dev_settings[16]	uint8_t	Буфер параметров из EEPROM
usSRegInBuf[1280]	USHORT	Буфер регистров ввода ModBus (осциллограмма)
usSRegHoldBuf[32]	USHORT	Буфер регистров хранения ModBus
last_byte_buff[32]	uint8_t	Буфер приёма оптических данных
out_arr[32]	uint16_t	Буфер значений сигнала для анализа
my_addr	uint8_t	Адрес устройства ModBus

4.2. Константы

Модуль ADC:

Константа	Значение	Описание
OVERLOAD_VALUE	0xDAEC	Порог перегрузки АЦП
TIMEOUT_VALUE	1000	Таймаут в мс
AVG_PHASE	184	Фаза по умолчанию
OUT_LENGTH	16	Длина вспомогательного пакета
TX_LENGTH	4	Длина основного пакета
HOLDING_START	0	Начальный адрес регистров ModBus
HOLDING_COUNT	16	Количество регистров ModBus

Модуль DAC:

Константа	Значение	Описание
SAMPLING_FREQUENCY	16000	Частота дискретизации
BUFFER_SIZE	320	Размер буфера для анализа
SIGNAL_DLY	10000	Таймаут ожидания сигнала
RELAY_DLY	5000	Задержка управления реле
MAX_DIFF	1500	Максимальное приращение сигнала
SLOW_LED_BLINK	500	Медленное мигание LED (мс)
FAST_LED_BLINK	150	Быстрое мигание LED (мс)
CONFIG_TIME	60000	Время активности режима конфигурации

4.3. Структура пакетов данных

Вспомогательный (дополнительный) пакет (16 байт):

Смещение	Размер	Назначение
0–1	2 байта	Синхробайты (0xAA)
2–5	4 байта	CRC32 уникального ID МК (ADC) / серийный номер передатчика (DAC)
6	1 байт	Версия ПО (ADC) / версия ПО передатчика (DAC)
7	1 байт	Флаги состояния (ADC) / состояние передатчика (DAC)
8–9	2 байта	Температура DS18B20 (×100, int16_t)
10–13	4 байта	Резерв
14–15	2 байта	CRC16 пакета

Основной пакет (4 байта):

Смещение	Размер	Назначение
0–1	2 байта	Данные АЦП (значение оцифрованного сигнала)
2	1 байт	CRC8 данных АЦП
3	1 байт	Байт вспомогательного/дополнительного пакета

5. ОПИСАНИЕ ФУНКЦИЙ

5.1. Основные функции модуля ADC

int main(void)

- Назначение: главная функция программы.
- Алгоритм:

1. Инициализация HAL и тактирования;
2. Вычисление CRC уникального ID МК;
3. Чтение параметров из Flash-памяти;
4. Определение режима работы по пину MODE;
5. Инициализация периферии в зависимости от режима;
6. Запуск основного цикла.

void MakeOutArr(void)

- Назначение: формирование вспомогательного пакета данных.
- Выход: заполненный массив out_arr[OUT_LENGTH].

uint16_t mb_reg_callback(...)

- Назначение: callback-функция для регистров хранения ModBus.
- Параметры: буфер данных, адрес регистра, количество регистров, режим (чтение/запись).

5.2. Основные функции модуля DAC

int main(void)

- Назначение: главная функция программы.
- Алгоритм:

    1. Инициализация HAL и тактирования;
    2. Вычисление CRC уникального ID МК;
    3. Определение типа устройства по пину M_TYPE;
    4. Чтение параметров из EEPROM;

5. Инициализация ModBus RTU;
6. Настройка DMA для приёма оптических данных;
7. Запуск основного цикла.

void analyze_signal(...)

- Назначение: анализ сигнала для определения частоты и амплитуды.
- Параметры: буфер отсчётов, расчётная частота (выход), амплитуда (выход), флаг синусоидальности (выход), уровень нуля.

int find_consecutive_aa_position(...)

- Назначение: поиск позиции синхробайтов в потоке.
- Возвращает: позицию или -1 при отсутствии.

void uart_receive_init(void)

- Назначение: инициализация USART2 с DMA для циклического приёма.

5.3. Вспомогательные функции

Функция	Назначение
TIM14_Init(uint16_t value)	Инициализация TIM14 с заданным периодом
TIM17_Init(void)	Инициализация TIM17
uint8_t compare_float(float f1, float f2)	Сравнение float с заданной точностью
eMBRegInputCB()	Обработка чтения регистров ввода (DAC)
eMBRegHoldingCB()	Обработка чтения/записи регистров хранения (DAC)
UART_RxCpltCallback()	Завершение приёма по DMA, декодирование пакета, анализ CRC8 (DAC)
TIM7_Callback()	Запуск передачи по SPI (DAC)
SPI_Callback()	Последовательная отправка данных по SPI (DAC)

6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВНЕШНИМИ УСТРОЙСТВАМИ

6.1. Интерфейс ModBus RTU

Модуль ADC:

- Порт: USART2;
- Скорость: 115200 бод;
- Параметры: 8 бит данных, 1 стоп-бит, без контроля чётности;
- Адрес устройства: 1;
- Функции: 0x03 (чтение регистров хранения), 0x06 (запись одного регистра), 0x10 (запись нескольких регистров).

Модуль DAC:

- Порт: USART1;
- Скорость: 115200 бод;
- Параметры: 8 бит данных, 1 стоп-бит, без контроля чётности;
- Управление DE: линия PA12;
- Функции: 0x03, 0x04 (чтение регистров ввода), 0x06, 0x10.

Карта регистров хранения модуля ADC:

Адрес	Назначение	Тип	Диапазон
0–3	CRC32 UID	Только чтение	—
4	Версия ПО	Только чтение	—
5	Флаги состояния	Только чтение	—
6–7	Коэффициент масштабирования	Чтение/запись	0.949 – 1.049
8	Фаза	Чтение/запись	1 – 1250
9–15	Резерв	—	—

Карта регистров хранения модуля DAC:

Адрес	Назначение	Тип	Диапазон	Описание
0–1	RX_SERIAL	R	—	CRC32 UID МК приёмника
2	RX_VERSION	R	—	Версия ПО приёмника
3	DEV_TYPE	R	1-2	Тип устройства
4-5	TX_SERIAL	R	—	Серийный номер передатчика
6	TX_VERSION	R	—	Версия ПО передатчика
7	SYS_STATE	R	—	Состояние передатчика и приёмника
8-9	RX_SCALE	R/W	0.949–1.051	Коэффициент масштабирования
10	RX_PHASE	R/W	0–255	Фаза сигнала
11	RX_ZERO_LEVEL	R/W	0–255	Уровень нуля
12	MB_ADDR	R/W	1–24	Адрес ModBus
13	BOI_NUM	R/W	1–65535	Номер БОИ
14-15	CONFIG_REG	R/W	—	Регистр конфигурации
16-17	OPTO_ERR_COUNT	R	—	Счётчик ошибок оптического канала
18	DS18B20	R	—	Температура с датчика (×100)
19	SIG_AMPL	R	—	Амплитуда сигнала
20	FFT_FREQ	R	—	Основная частота сигнала

Регистры ввода (Input Registers) модуля DAC: адреса 0–1279 — буфер осциллограммы (только в режиме конфигурации).

6.2. Оптический интерфейс

Модуль ADC:

- Порт: USART1;
- Скорость: 2 Мбит/с;
- Режим: только отправка (TX);
- Формат: пакеты по 16 байт (вспомогательный) и 4 байта (основной) с синхробайтами 0xAA.

Модуль DAC:

- Порт: USART2;
- Скорость: 2 Мбит/с;
- Режим: только приём (RX);
- Инверсия: настраиваемая (зависит от состояния PA8);
- Формат: пакеты по 16 байт (дополнительный) и 4 байта (основной) с синхробайтами 0xAA.

6.3. Интерфейс SPI

Модуль ADC:

- Назначение: связь с внешним 16-битным АЦП TPC5161;
- Режим: Master;
- Используется для чтения данных преобразования.

Модуль DAC:

- Назначение: выходной интерфейс для управления внешним 16-битным ЦАП;
- Режим: Master, полный дуплекс;
- Скорость: до 18 Мбит/с (делитель 4);
- Формат: 8 бит, MSB first.

6.4. Интерфейс 1-Wire (модуль ADC)

- Библиотека: my_ow;
- Датчики: DS18B20, DS18S20;
- Период опроса: 10 секунд;
- Формат данных: температура в °C × 100 (int16_t).

6.5. Память EEPROM I2C (модуль DAC)

- Адрес: I2C1_DEVICE_ADDRESS (обычно 0xA0);
- Организация: последовательный доступ;
- Хранимые параметры:
    - коэффициент масштабирования (4 байта);
    - фаза (2 байта);
    - адрес ModBus (2 байта);
    - номер БОИ (2 байта).

7. ОБРАБОТКА ОШИБОК

7.1. Флаги состояния

Модуль ADC (PSW_REG, uint16_t):

Бит	Маска	Описание
0	F_ADC_OVR	Перегрузка АЦП
1	F_ADC_TOUT	Таймаут АЦП
2	F_FLASH_ERR	Отказ внутренней памяти
8	F_OW_EN	1-Wire интерфейс активен
9	F_SETUP	Режим настройки активен
10	F_ADC_START	Старт измерения АЦП

Модуль DAC (PSW_REG, uint32_t):

Бит	Маска	Описание
0	F_KEY_INIT_DOWN	Кнопка нажата
1	F_KEY_INIT_UP	Кнопка отпущена
2	F_INIT	Режим конфигурации активен
3	F_RELAY_ON	Реле включено
4	F_E_NO_INPUT	Входной сигнал отсутствует

7.2. Механизмы восстановления

- **Сторожевой таймер (IWDG):**
  - Модуль ADC: таймаут ~327 мс;
  - Модуль DAC: таймаут ~163 мс.
- **Контроль перегрузки АЦП:** автоматический сброс флага F_ADC_OVR.
- **Контроль целостности данных:** проверка CRC8 (быстрая) и CRC16 (полная) в модуле DAC.
- **Проверка параметров:** коррекция некорректных значений при записи.
- **Автоматическое управление реле:** включение при наличии сигнала, выключение при таймауте.
- **Сброс системы:** при изменении параметров в режиме настройки/конфигурации.

8. ТРЕБОВАНИЯ К НАДЁЖНОСТИ

- Время наработки на отказ: не менее 10 000 часов;
- Восстановление после сбоя: автоматическая перезагрузка по IWDG;
- Защита данных:
    - контроль целостности параметров во Flash (модуль ADC);
    - циклические контрольные суммы;
    - безопасное обновление EEPROM с проверкой записи (модуль DAC);
- Температурный диапазон эксплуатации: от минус 40 °C до плюс 85 °C.

9. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ

9.1. Оптимизация производительности

- Использование LL (Low Layer) драйверов для минимальных задержек;
- DMA для передачи данных по UART (модуль ADC) и приёма по USART2 (модуль DAC);
- Циклический буфер для минимизации потерь данных (модуль DAC);
- Инлайн-функции для часто используемых операций;
- Энергоэффективные режимы таймеров.

9.2. Безопасность и надёжность

- Двойная проверка CRC (CRC8 для быстрой, CRC16 для полной проверки);
- Защита от «зависаний» через сторожевой таймер;
- Валидация всех входящих параметров;
- Безопасное обновление параметров с проверкой диапазонов.

9.3. Диагностика и отладка

- Светодиодная индикация состояния (модуль DAC):
  - медленное мигание — ожидание сигнала;
  - постоянное горение — реле включено;
  - быстрое мигание — ошибка чтения EEPROM;
- Регистры состояния для удалённой диагностики через ModBus;
- Возможность снятия осциллограммы в режиме конфигурации (модуль DAC);
- Интеграция с системой мониторинга I-TOR C.O.B.A. для сбора телеметрии и фиксации ошибок.

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

Номера листов (страниц)					Всего листов (листов) в докум.	№ документа	Входящий № сопроводит. Докум. И дата	Подп.	Дата
Изм.	измененных	замененных	новых	аннулированных					