

▷ Документация: Автоматический регулятор давления воздуха с коррекцией по О₂

Цель системы: Поддержание оптимального содержания кислорода в уходящих газах котла за счёт двухуровневого управления давлением воздуха:

1. Базовое соотношение газ/воздух по таблице (5 точек)
2. Тонкая ПИД-коррекция по отклонению О₂ от уставки
Управление — через Modbus-реле (импульсное: "больше"/"меньше").

▷ Структура проекта

/main.py	– Точка входа, запуск AP и основного цикла
/ads1115.py	– Чтение данных с двух модулей ADS1115 (4 диф. канала)
/modbus_relay.py	– Управление 4-канальным Modbus-реле (адрес = 2)
/config_manager.py	– Загрузка/сохранение конфигурации (включая таблицу и ПИД)
/url_decode.py	– Декодирование URL-параметров
/webserver.py	– Веб-сервер: калибровка, управление, настройка регулятора
/air_pressure_controller.py	– Двухуровневый авторегулятор (таблица + ПИД)

▷ Подключение оборудования

Устройство	ESP32 GPIO	Примечание
ADS1115 модуль 1	SDA=4, SCL=5, ADDR=GND → 0x48	Каналы 0-1, 2-3 → О ₂ датчики
ADS1115 модуль 2	SDA=4, SCL=5, ADDR=VCC → 0x49	Канал 0-1 → расход газа, 2-3 → давление воздуха
Modbus-реле	TX=GPIO0, RX=GPIO1 (UART1)	Адрес устройства = 2, 9600 бод, 8N1
Wi-Fi	–	Режим точки доступа (AP)

⚠ Важно: GPIO0 — BOOT-пин! Убедитесь, что при старте он не заземлён.

▷ Каналы измерения

Канал	Назначение	Конфигурация по умолчанию
ch0	О ₂ датчик 1	0–1 В → 0–25 %
ch1	О ₂ датчик 2	0–1 В → 0–25 %
ch2	Расход газа	0–1 В → 0–100 м ³ /ч
ch3	Давление воздуха	0–1 В → 0–10 кПа

Все значения автоматически усредняются/масштабируются согласно калибровке в config.json .

▷ Логика авторегулятора (`air_pressure_controller.py`)

1. Базовый уровень: таблица газ/воздух

- При текущем расходе газа (ch2) система линейно интерполирует целевое давление воздуха из таблицы air_fuel_table (5 точек).
- Пример:

```
{"gas": 50.0, "air_target": 3.5}
```

→ При расходе газа 50 м³/ч → целевое давление = 3.5 кПа.

2. Тонкий уровень: ПИД-коррекция по О₂

- Измеряется **среднее О₂** от двух датчиков.
- Цель: O₂ = o2_setpoint (например, 3.5%).
- ПИД-выход = K_p·e + K_i·∫e·dt + K_d·de/dt
- Результат – **добавка к базовому давлению** (коррекция).

3. Ограничение коррекции

- Параметр max_correction (например, 0.8 кПа) **ограничивает отклонение** от базовой кривой.
- Если ПИД требует больше – он обрезается до лимита.

4. Управление реле

- Если коррекция > +0.1: включить реле 2 на impulse_duration сек → **увеличить давление**.
- Если коррекция < -0.1: включить реле 1 на impulse_duration сек → **уменьшить давление**.
- Иначе: HOLD (нет импульсов).

Управление происходит не чаще, чем раз в control_interval секунд.

⚙ Конфигурация (config.json)

Секция auto_control → переименована в pid_control

```
"pid_control": {  
    "enabled": true,  
    "o2_setpoint": 3.5,  
    "deadband": 0.1,  
    "Kp": 0.8,  
    "Ki": 0.02,  
    "Kd": 0.1,  
    "max_correction": 0.8,  
    "control_interval": 10,  
    "impulse_duration": 1.5,  
    "pressure_min_safe": 0.5,  
    "pressure_max_safe": 9.0  
}
```

Секция air_fuel_table (5 точек)

```
"air_fuel_table": [  
    {"gas": 0.0, "air_target": 1.0},  
    {"gas": 20.0, "air_target": 2.0},  
    {"gas": 50.0, "air_target": 3.5},  
    {"gas": 80.0, "air_target": 6.0},  
    {"gas": 100.0, "air_target": 8.5}  
]
```

🕸 Веб-интерфейс

Доступ: <http://192.168.4.1>

SSID: ADS1115_Sensor, пароль: 12345678

1. Калибровка датчиков

- Для каждого канала:
Напряжение (V_min – V_max) → Значение (Y_min – Y_max) + единица измерения

2. Таблица газ/воздух

- Редактируемая таблица из 5 строк:
Расход газа ($\text{м}^3/\text{ч}$) → Целевое давление (кПа)

3. ПИД-настройки

- Включение/выключение
- Уставка O_2 , зона нечувствительности
- Коэффициенты K_p, K_i, K_d
- `max_correction, control_interval, impulse_duration`
- Безопасные пределы давления

4. Ручное управление реле

- Реле 1: "Меньше" (\downarrow давление)
- Реле 2: "Больше" (\uparrow давление)
- Реле 3–4: доступны для других задач

☒ Как работает "максимальная коррекция"?

- Это **предел отклонения** от базовой кривой.
- Если ПИД требует коррекцию +1.2 кПа, а `max_correction = 0.8` → будет **+0.8 кПа**.
- Цель:**
 - Не уходить в опасные режимы,
 - Сохранять смысл базовой таблицы,
 - Сигнализировать об ошибке:** если коррекция = $\pm \text{max}$ – обновите таблицу!

☒ Алгоритм работы в цикле

- Раз в `control_interval` секунд:
 - Считать напряжения с ADS1115
 - Применить калибровку → получить физические значения
 - Определить базовое давление по таблице
 - Вычислить ошибку O_2
 - Рассчитать ПИД-коррекцию (с ограничением)
 - При необходимости – импульс реле 1 или 2
- Параллельно: обработка HTTP-запросов (калибровка, управление, настройка)

☒ Диагностика и настройка

Симптом	Возможная причина	Решение
Нет импульсов, $O_2 \neq$ уставке	Таблица газ/воздух сильно ошибочна	Обновите точку в таблице
Постоянно коррекция = +0.8	Недостаток воздуха по базовой кривой	Увеличьте <code>air_target</code> в таблице
Реле срабатывает, но давление не растёт	Механическая неисправность	Проверьте привод/вентилятор
O_2 "плавает"	Слишком высокий K_p	Уменьшите K_p , увеличьте <code>control_interval</code>

☒ Обновление базовой таблицы вручную

- Откройте веб-интерфейс.
- Посмотрите текущие значения:
 - Расход газа: `ch2`
 - Давление воздуха: `ch3`
 - Среднее O_2 : $(ch0 + ch1)/2$
- Если O_2 близок к уставке, но давление сильно отличается от таблицы – **замените значение `air_target` для этого расхода газа**.
- Сохраните.

После этого коррекция ПИД приблизится к нулю → система работает оптимально.

☒ Заключение

Система реализует **гибкий, безопасный и настраиваемый** регулятор, сочетающий:

- **Инженерное знание** (таблица газ/воздух)
- **Автоматическую адаптацию** (ПИД по O₂)
- **Удобную настройку** (веб-интерфейс)
- **Надёжное управление** (Modbus-реле)

☒ **Совет:** начните с грубой таблицы, затем корректируйте её на основе данных из веб-интерфейса.