

❏ Документация: Автоматический регулятор давления воздуха с коррекцией по O₂

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 O₂ 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 → O 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	O ₂ датчик 1	0–1 В → 0–25 %
ch1	O ₂ датчик 2	0–1 В → 0–25 %
ch2	Расход газа	0–1 В → 0–100 м³/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 O₂

- Измеряется **среднее O₂** от двух датчиков.
- **Цель:** O₂ = o2_setpoint (например, 3.5%).
- **ПИД-выход** = $K_p \cdot e + K_i \cdot \int e \cdot dt + K_d \cdot de/dt$
- 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 (м³/ч) → Целевое давление (кПа)

3. ПИД-настройки

- Включение/выключение
- Уставка O₂, 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" (↓ давление)
- Реле 2: "Больше" (↑ 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 = ±max — **обновите таблицу!**

❏ Алгоритм работы в цикле

1. Раз в control_interval секунд:
 - Считать напряжения с ADS1115
 - Применить калибровку → получить физические значения
 - Определить базовое давление по таблице
 - Вычислить ошибку O₂
 - Рассчитать ПИД-коррекцию (с ограничением)
 - При необходимости — импульс реле 1 или 2
2. Параллельно: обработка HTTP-запросов (калибровка, управление, настройка)

❏ Диагностика и настройка

Симптом	Возможная причина	Решение
Нет импульсов, O ₂ ≠ уставке	Таблица газ/воздух сильно ошибочна	Обновите точку в таблице
Постоянно коррекция = +0.8	Недостаток воздуха по базовой кривой	Увеличьте air_target в таблице
Реле срабатывает, но давление не растёт	Механическая неисправность	Проверьте привод/вентилятор
O ₂ "плавает"	Слишком высокий K _p	Уменьшите K _p , увеличьте control_interval

❏ Обновление базовой таблицы вручную

1. Откройте веб-интерфейс.
2. Посмотрите текущие значения:
 - Расход газа: ch2
 - Давление воздуха: ch3
 - Среднее O₂: (ch0 + ch1)/2
3. Если O₂ близок к уставке, но давление сильно отличается от таблицы — **замените значение air_target** для этого расхода газа.
4. 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.