

Трекай меня полностью. Как построить удобный инструмент для измерения энергопотребления

Владислав Кожушко

Про меня



Про меня

- С 2013 интересуюсь разработкой



Про меня

- С 2013 интересуюсь разработкой
- С 2016 интересуюсь аккумуляторами



Про меня

- С 2013 интересуюсь разработкой
- С 2016 интересуюсь аккумуляторами
- Несу радость в мир 🙌



Применение

Применение

- HW-инженеры

Применение

- HW-инженеры
- SW-инженеры

Применение

- HW-инженеры
- SW-инженеры
- QA-инженеры

Применение

- HW-инженеры
- SW-инженеры
- QA-инженеры
- Повышение качества сервисов

Сегодня узнаем

Сегодня узнаем

- Как оценивать источник питания и нагрузку

Сегодня узнаем

- Как оценивать источник питания и нагрузку
- Как мерять ток, напряжение, энергопотребление

Сегодня узнаем

- Как оценивать источник питания и нагрузку
- Как мерять ток, напряжение, энергопотребление
- Как автоматизировать измерения

Сегодня узнаем

- Как оценивать источник питания и нагрузку
- Как мерять ток, напряжение, энергопотребление
- Как автоматизировать измерения
- Подробную инструкцию

Предыстория



ХАКАТОН





Измерение энергопотребления мобильных приложений - Алексей


AvitoTech

Измерение энергопотребления мобильных



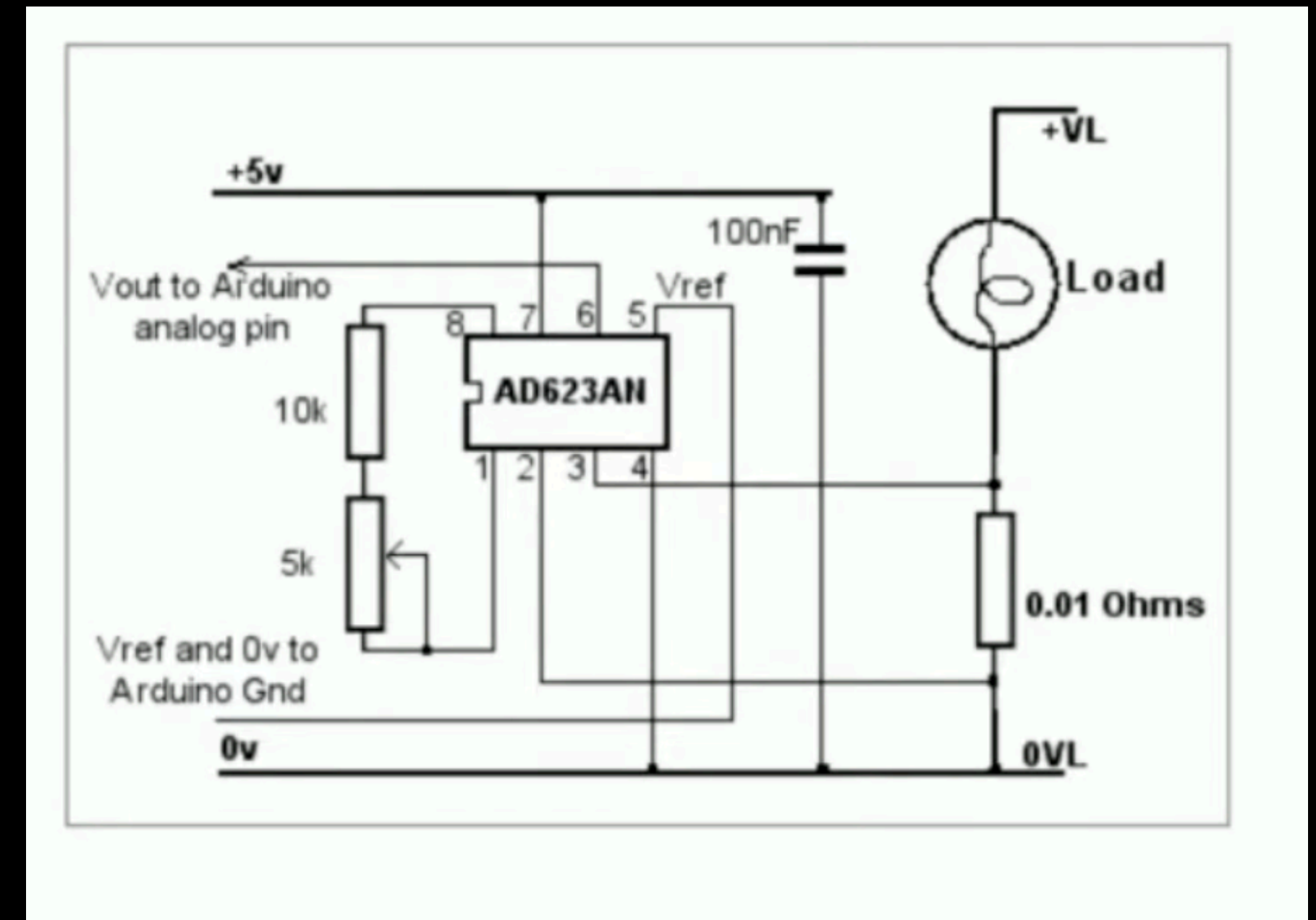
Алексей Лавренюк
Тимур Торубаров
Yandex



Смотреть на  YouTube

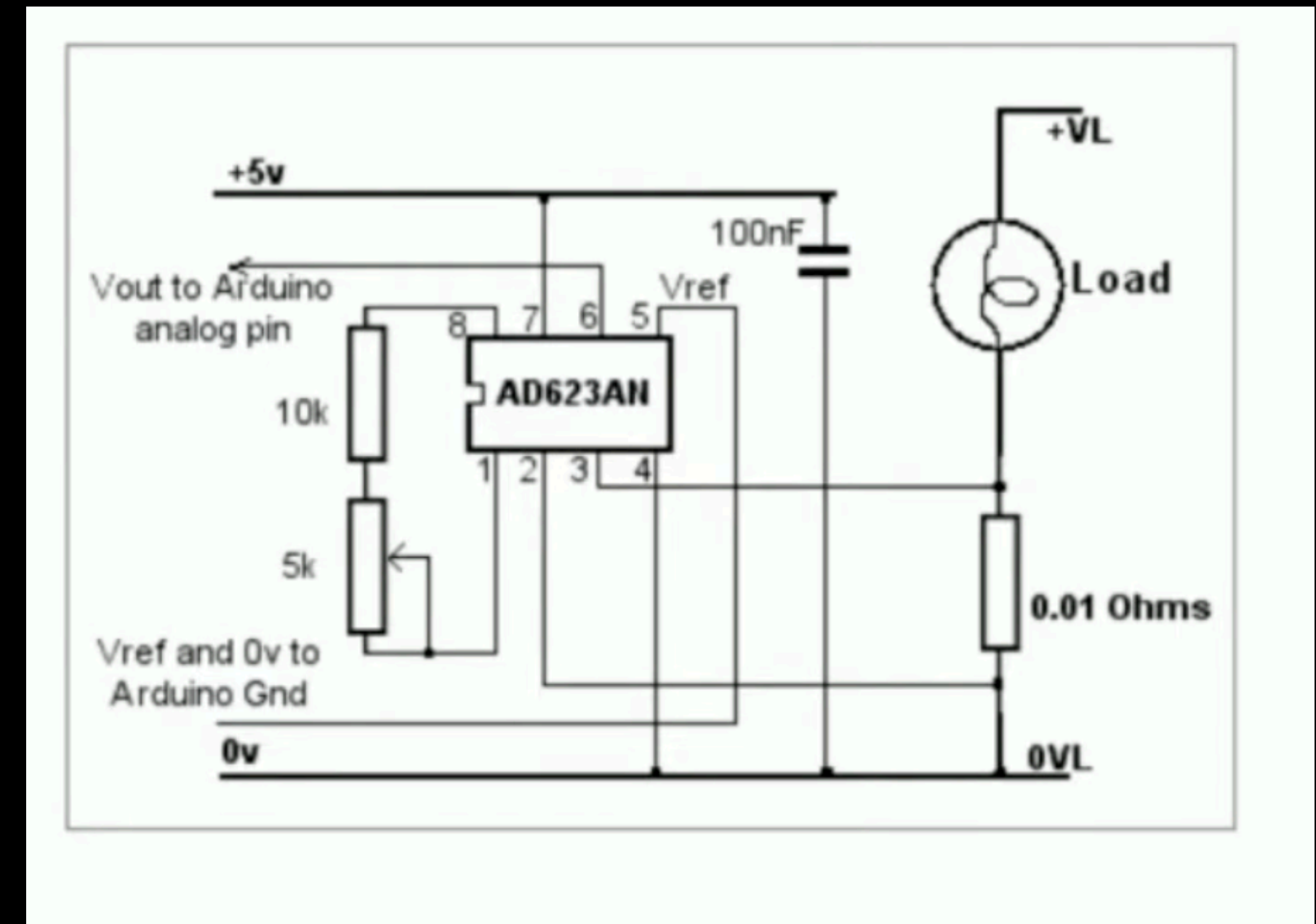


Что предложено



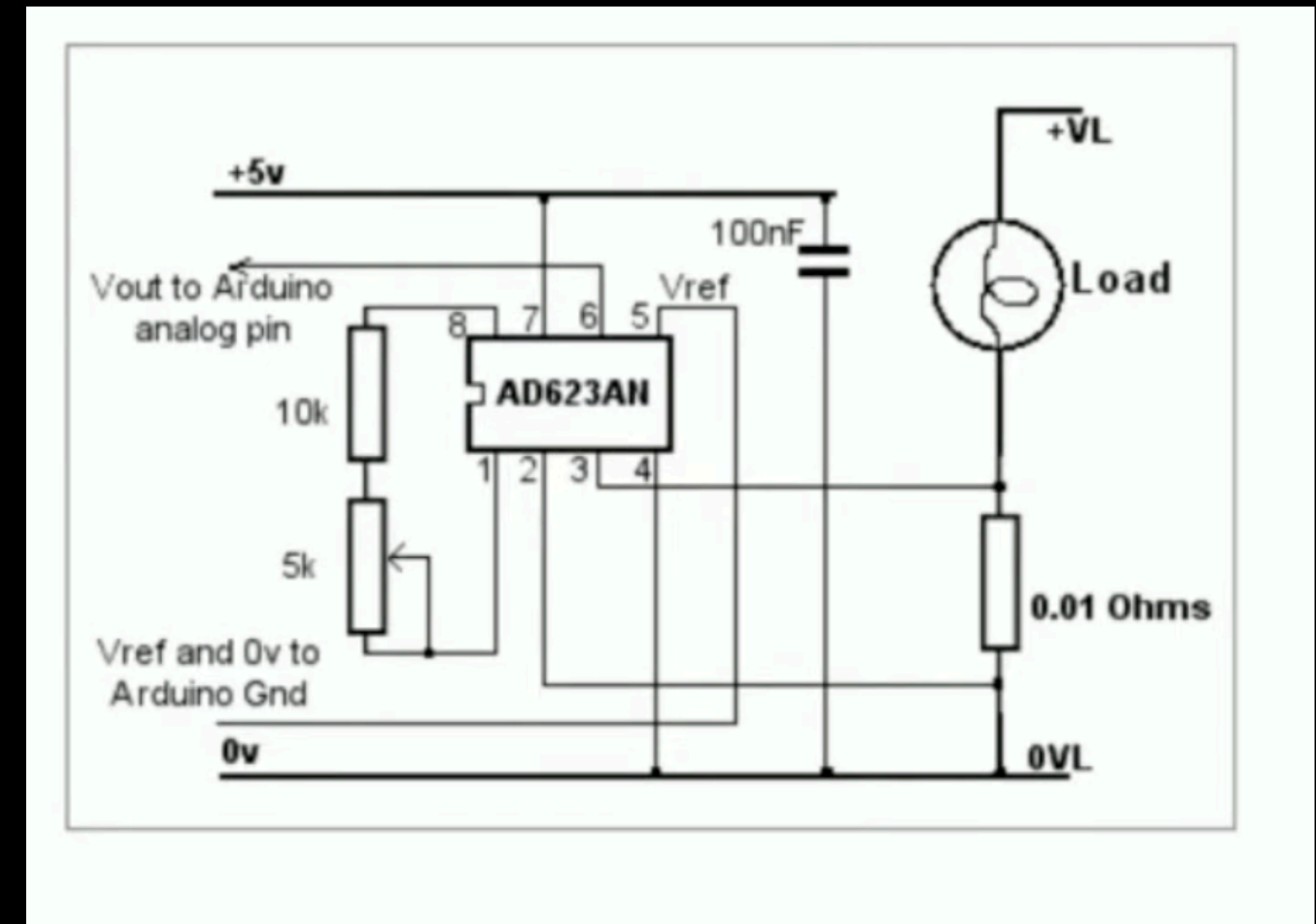
Что предложено

- МК Arduino (ATmega328P)



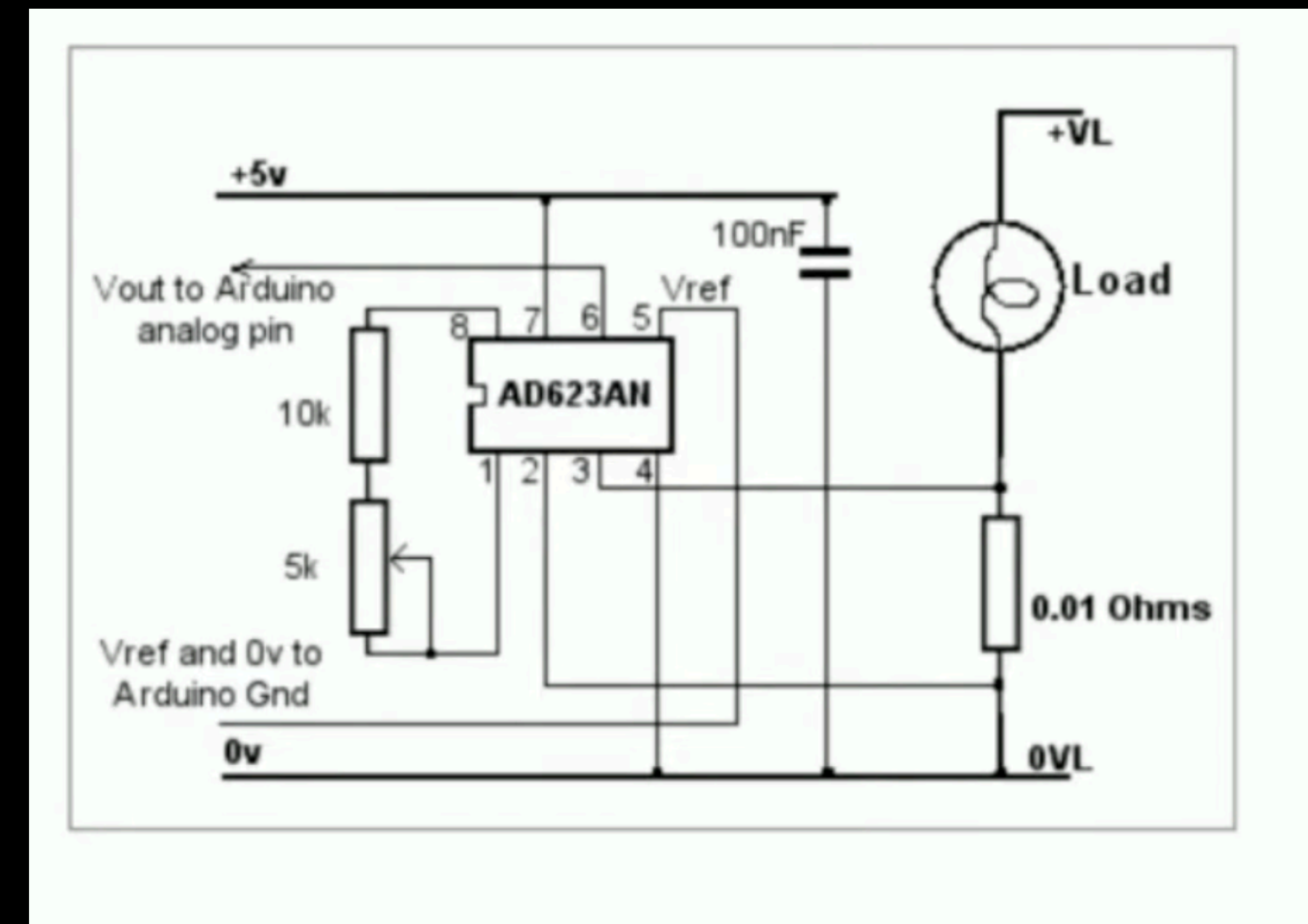
Что предложено

- МК Arduino (ATmega328P)
- Сборка схемы измерения



Что предложено

- МК Arduino (ATmega328P)
- Сборка схемы измерения
- Подключение по проводу к ПК
- 1 телефон - 1 набор (МК + схема)



План

План

План

- Основы

План

- Основы
- Выбор компонентов и сценарии

План

- Основы
- Выбор компонентов и сценарии
- Разработка и интеграция

План

- Основы
- Выбор компонентов и сценарии
- Разработка и интеграция
- Эксплуатация

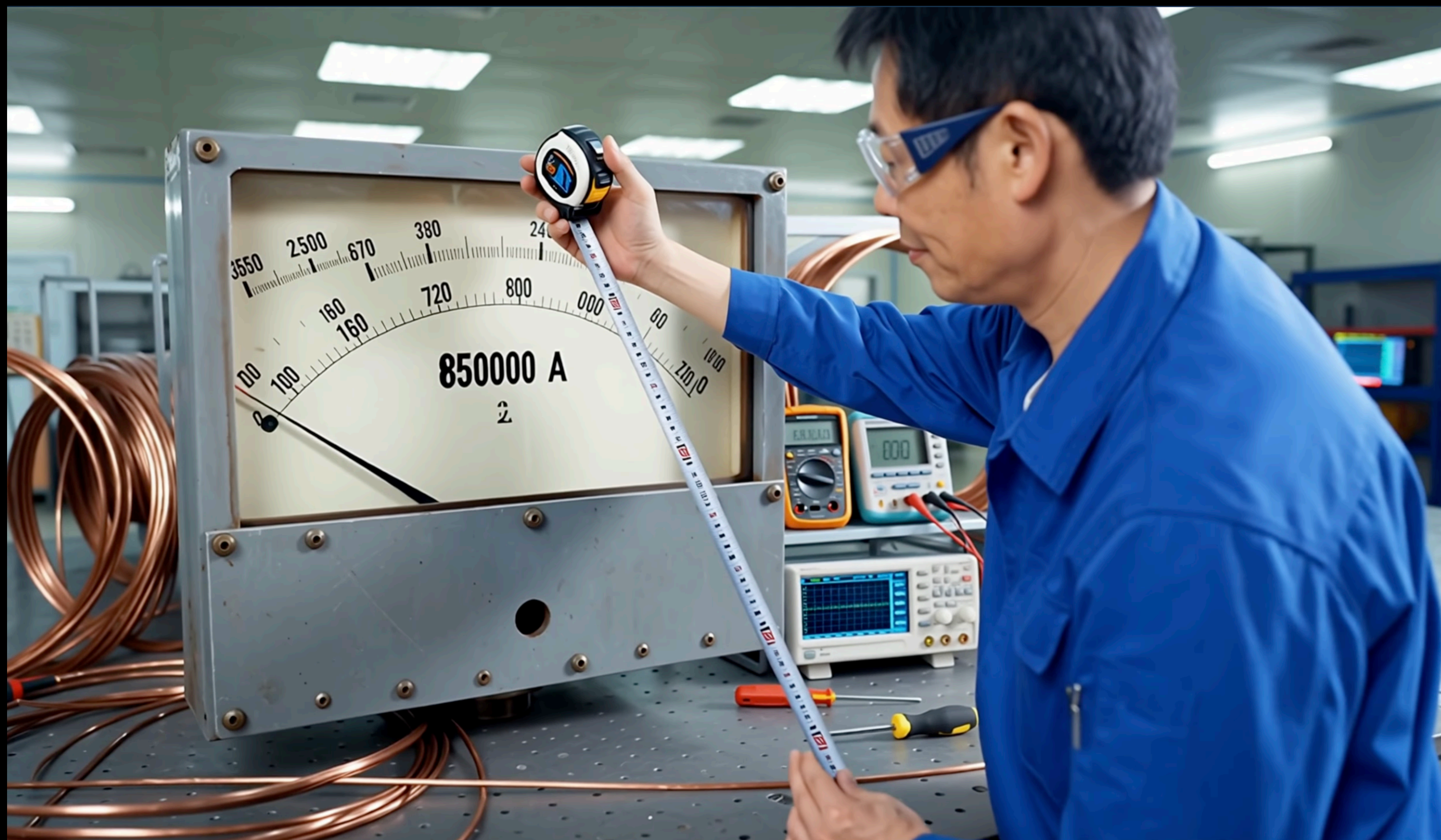
План

- Основы
- Выбор компонентов и сценарии
- Разработка и интеграция
- Эксплуатация
- Бонус

ОСНОВЫ



Как измерять ток?



Способы измерения тока



Способы измерения тока

- Эффект Холла



Способы измерения тока

- Эффект Холла
- ТокОВЫЙ шунТ



Эффект Холла

Эффект Холла

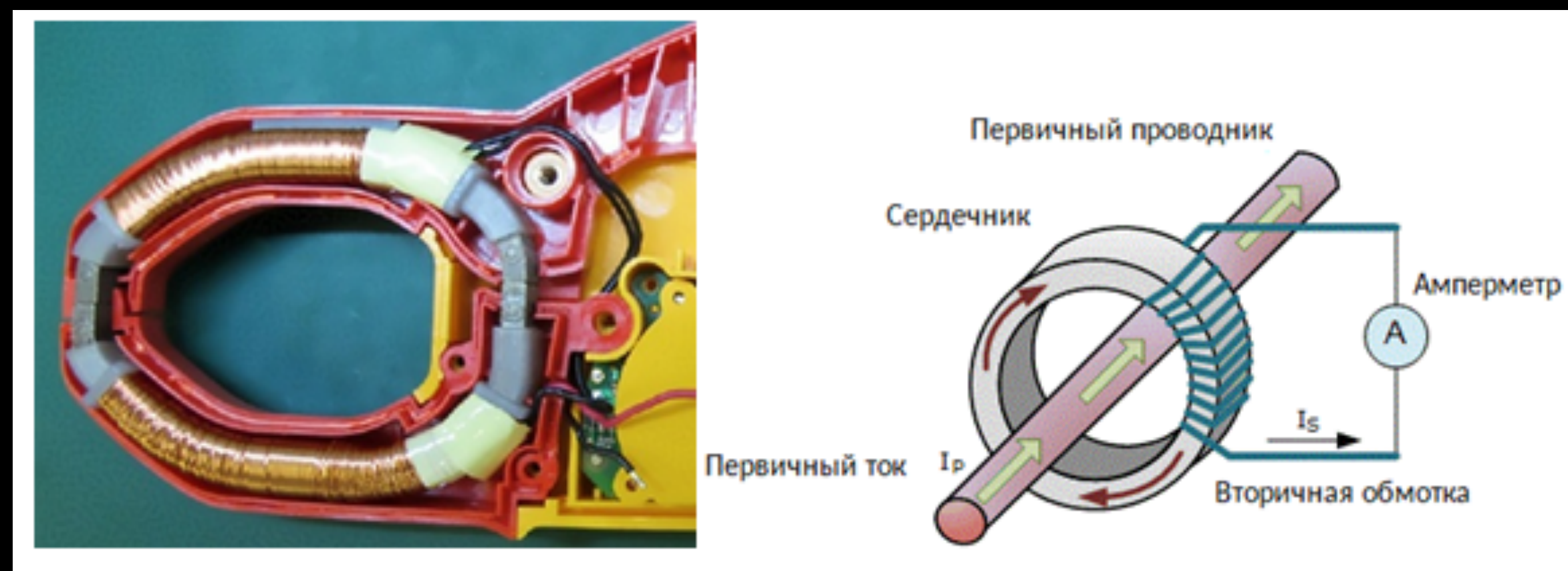


Эффект Холла



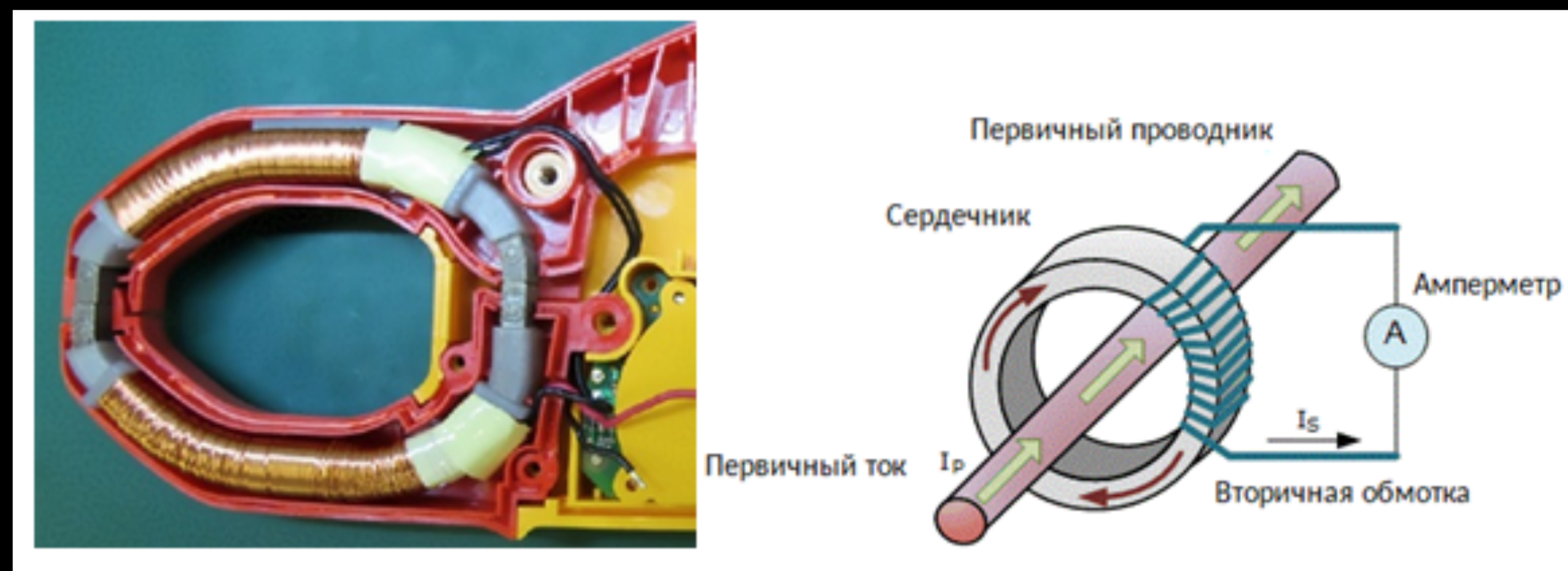
Эффект Холла

- Гальваническая развязка



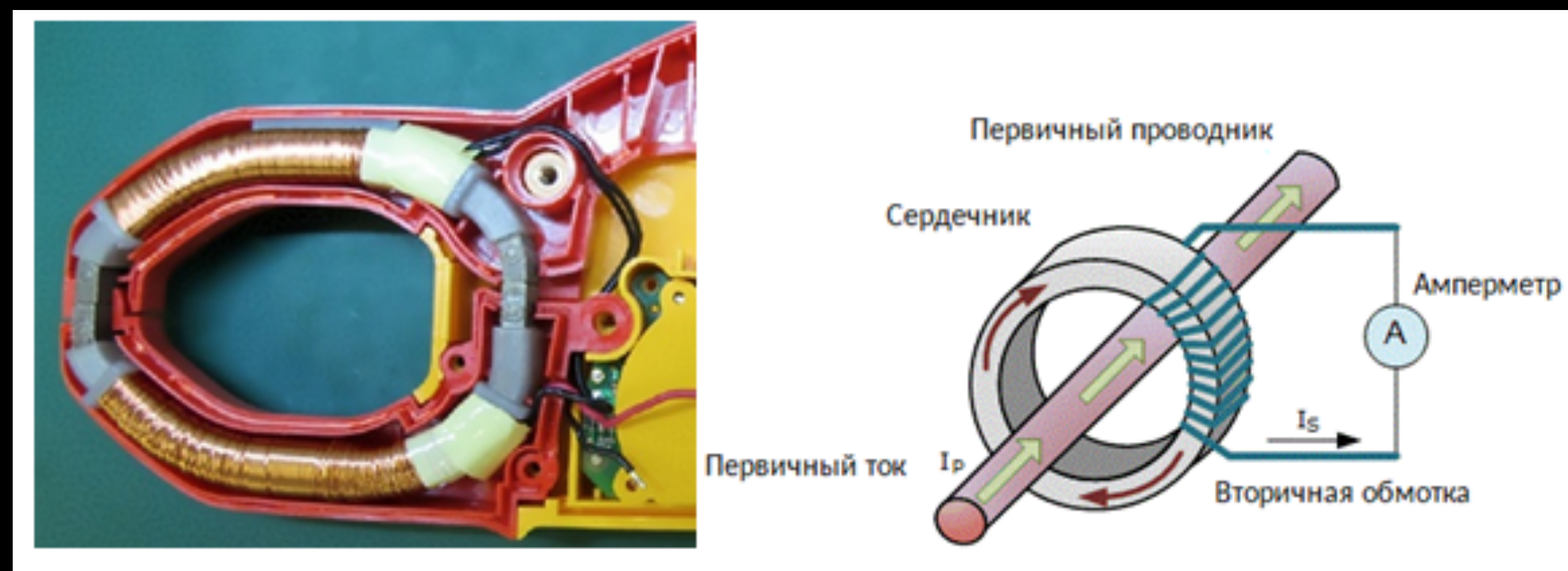
Эффект Холла

- Гальваническая развязка
- AC/DC



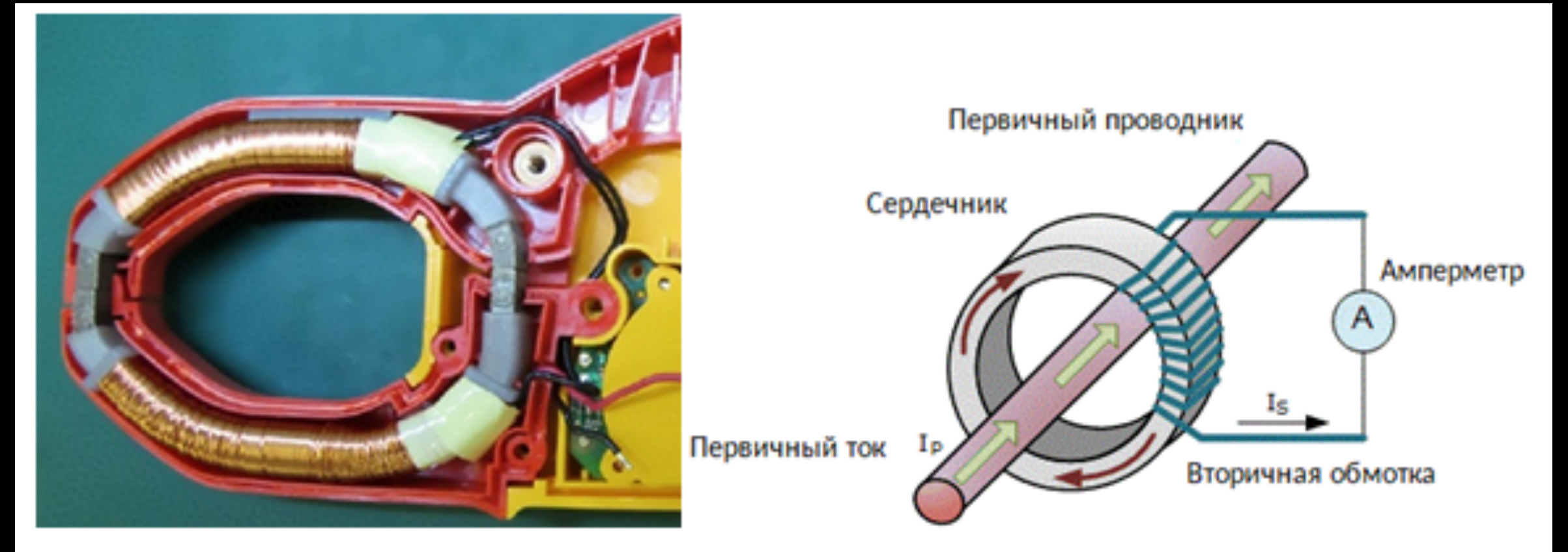
Эффект Холла

- Гальваническая развязка
- AC/DC



Эффект Холла

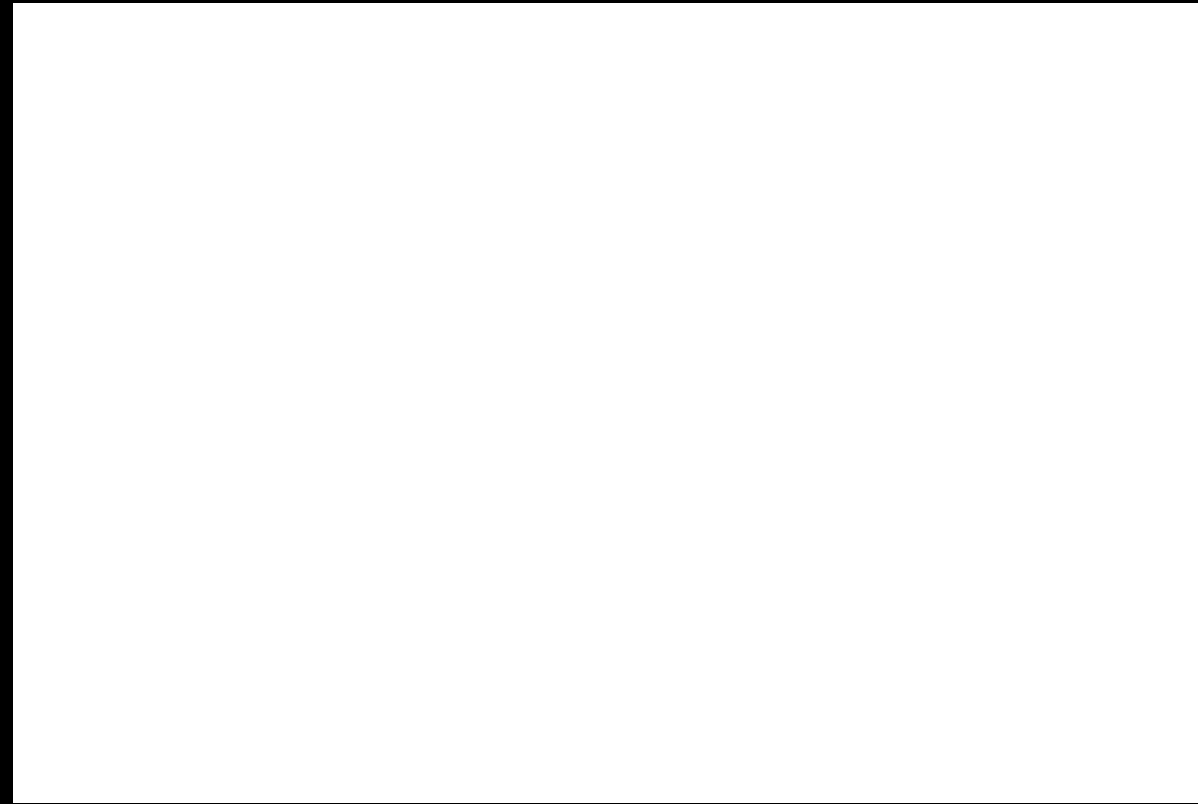
- Гальваническая развязка
- AC/DC
- Помехи



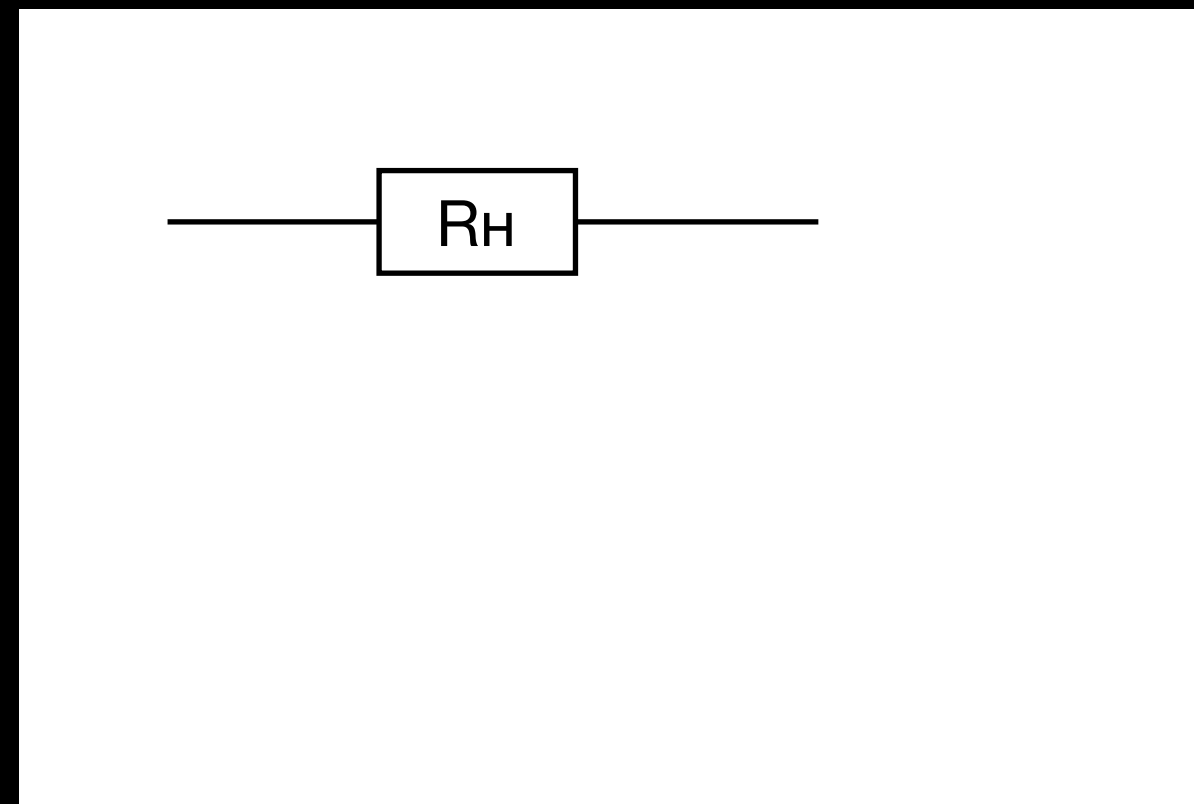


Токовый шунт

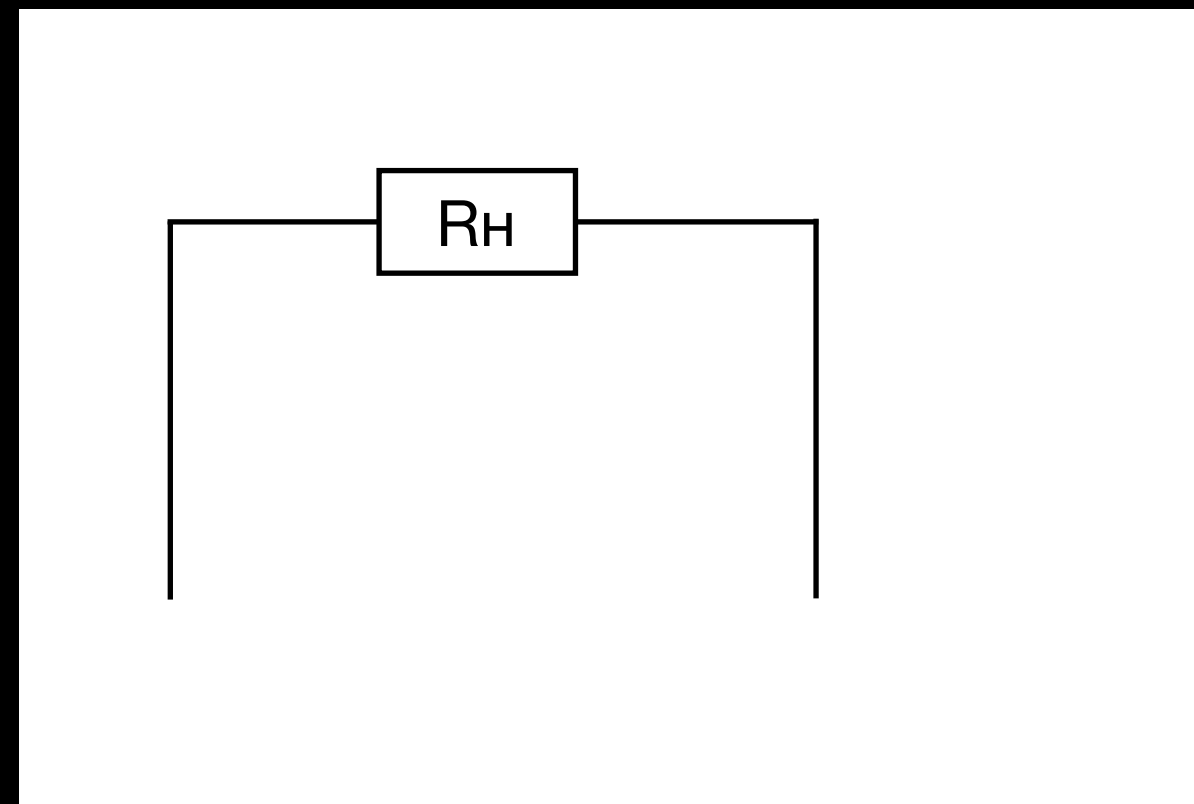
Токовый шунт



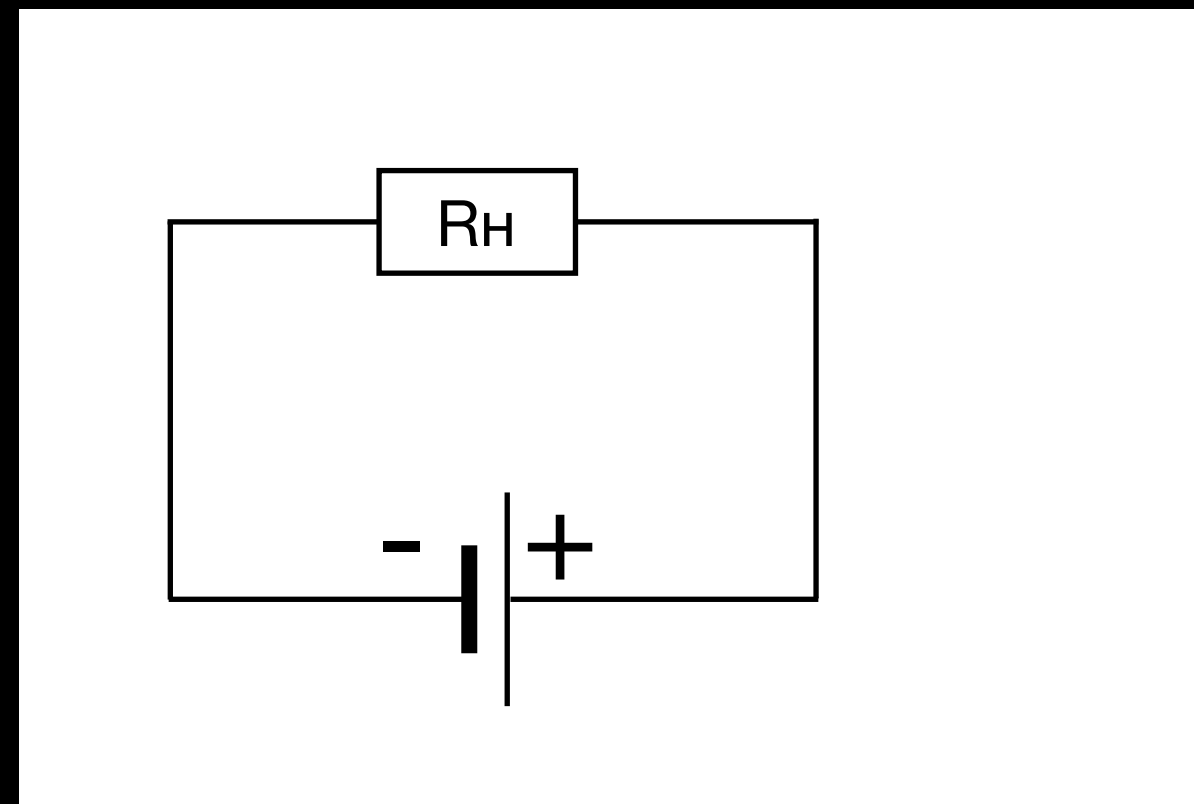
Токовый шунт



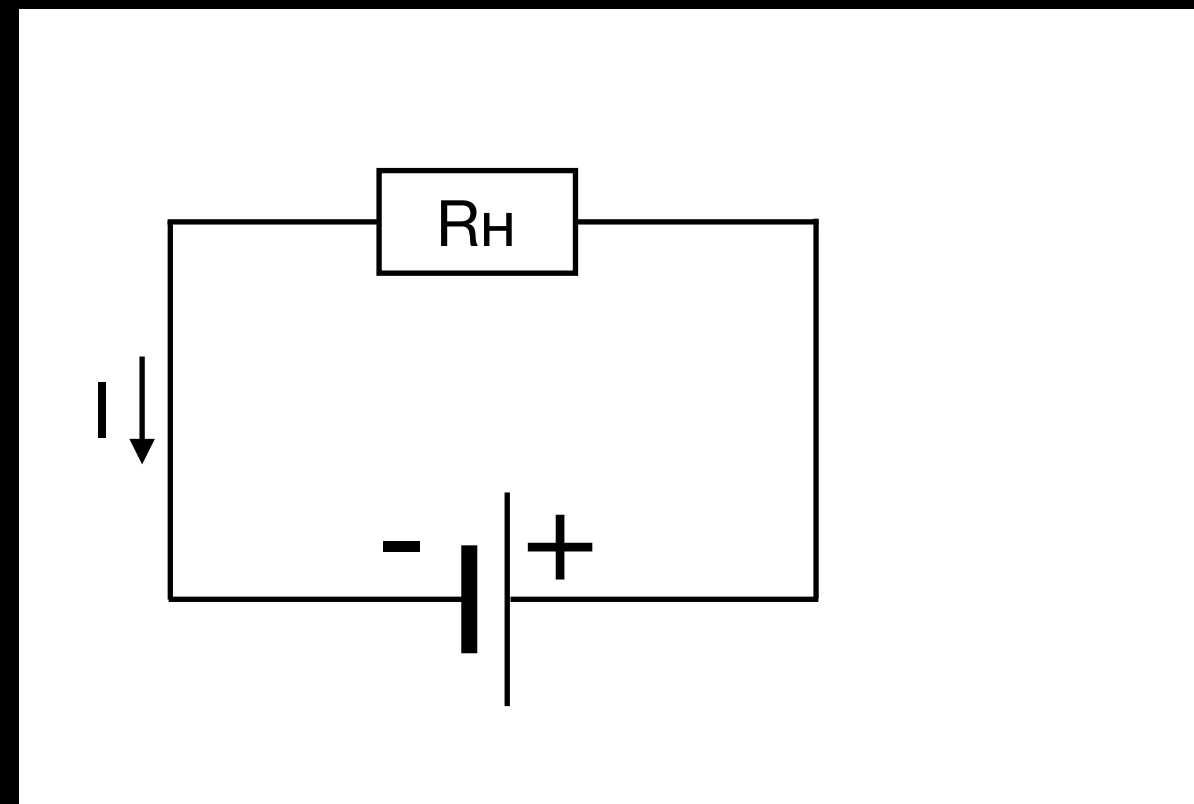
Токовый шунт



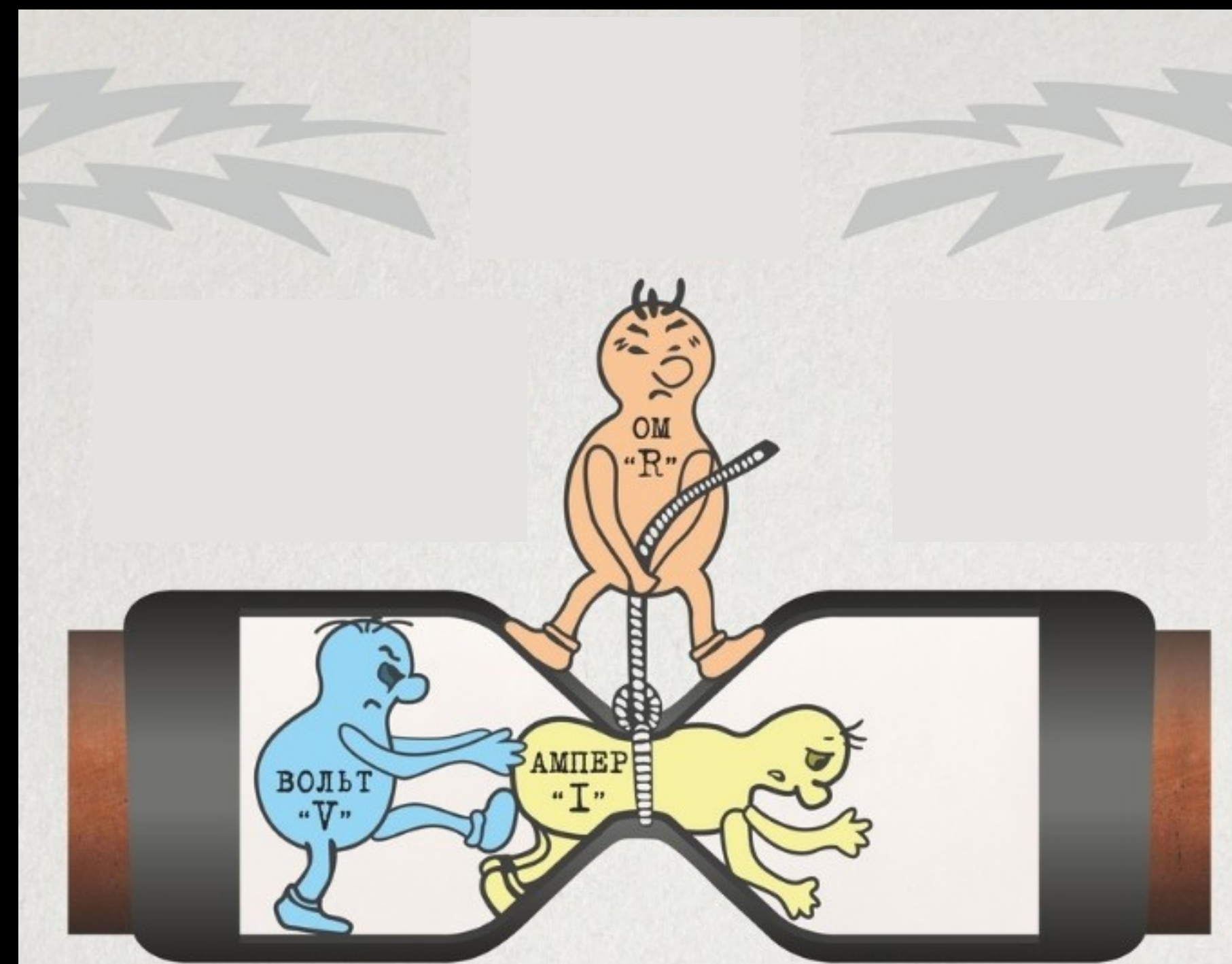
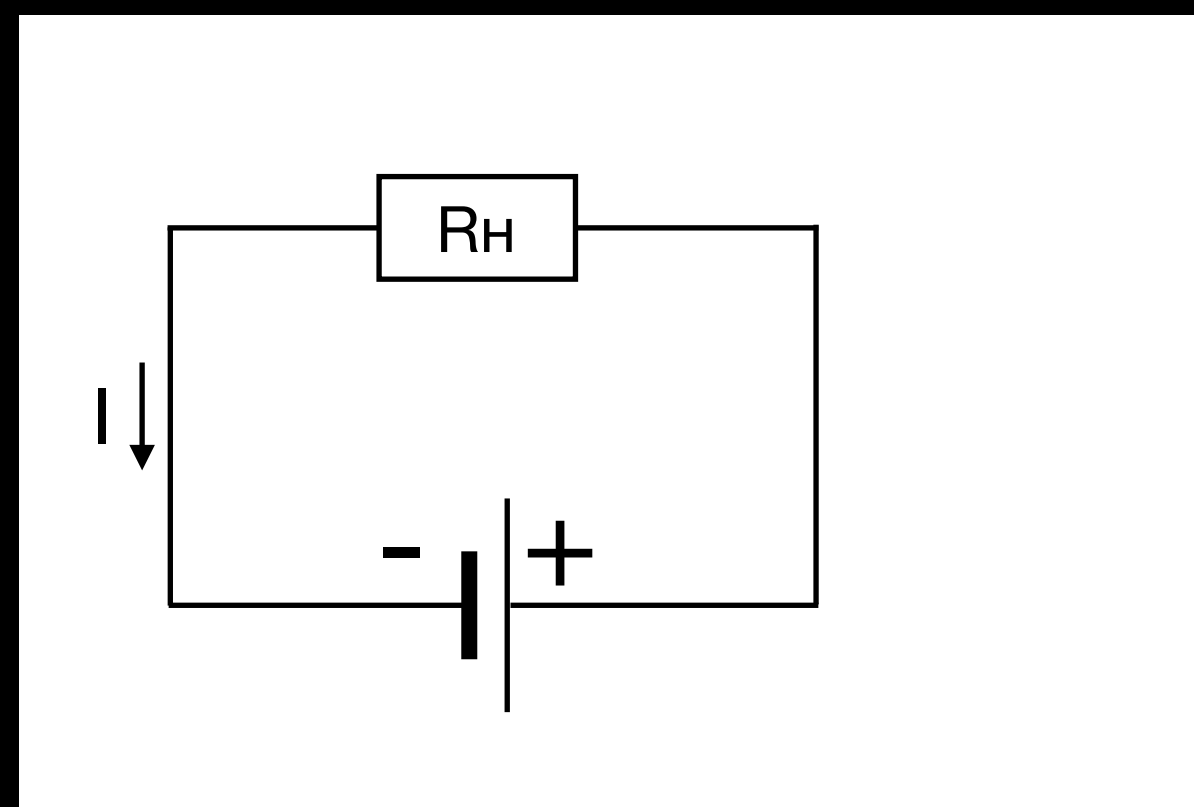
Токовый шунт



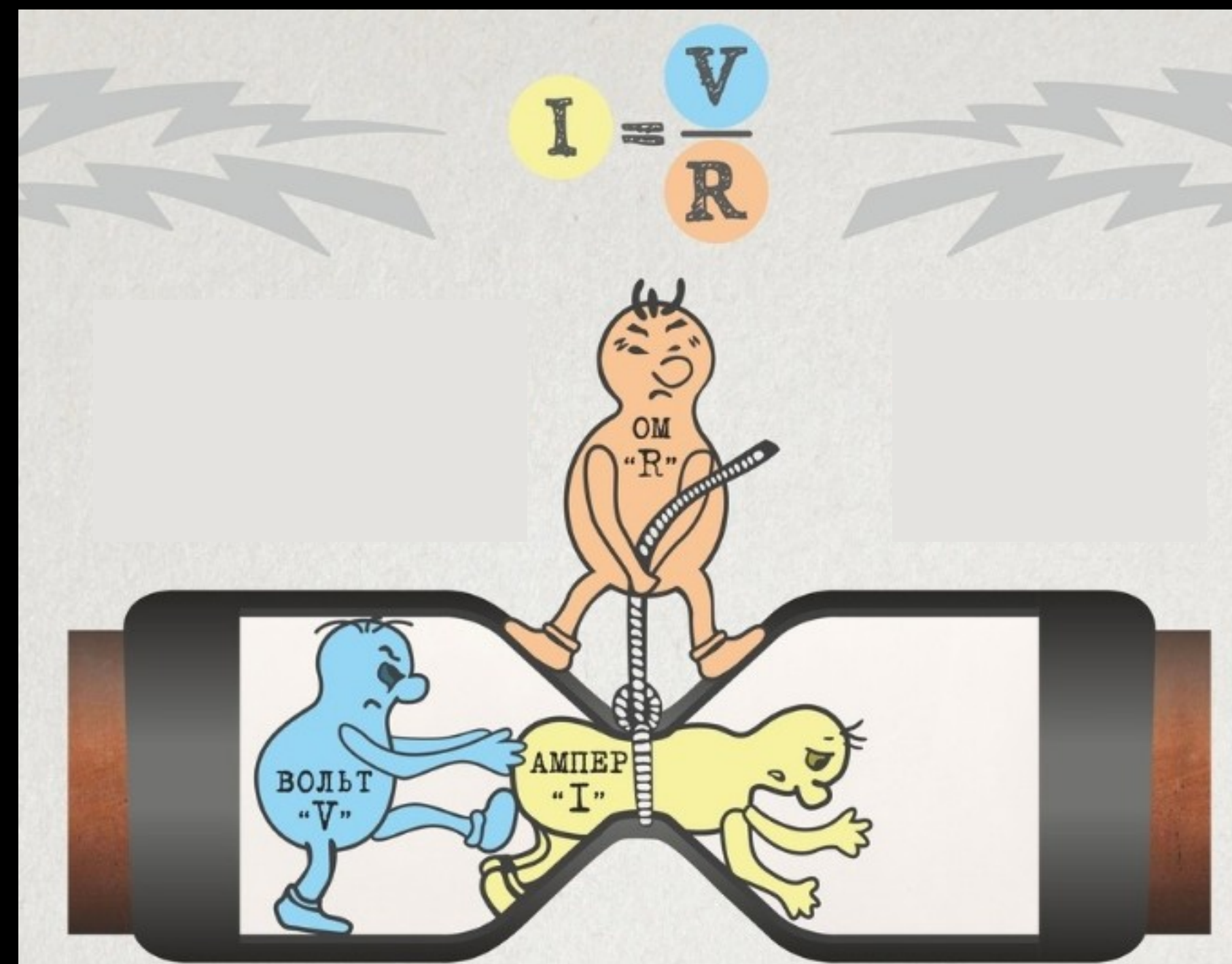
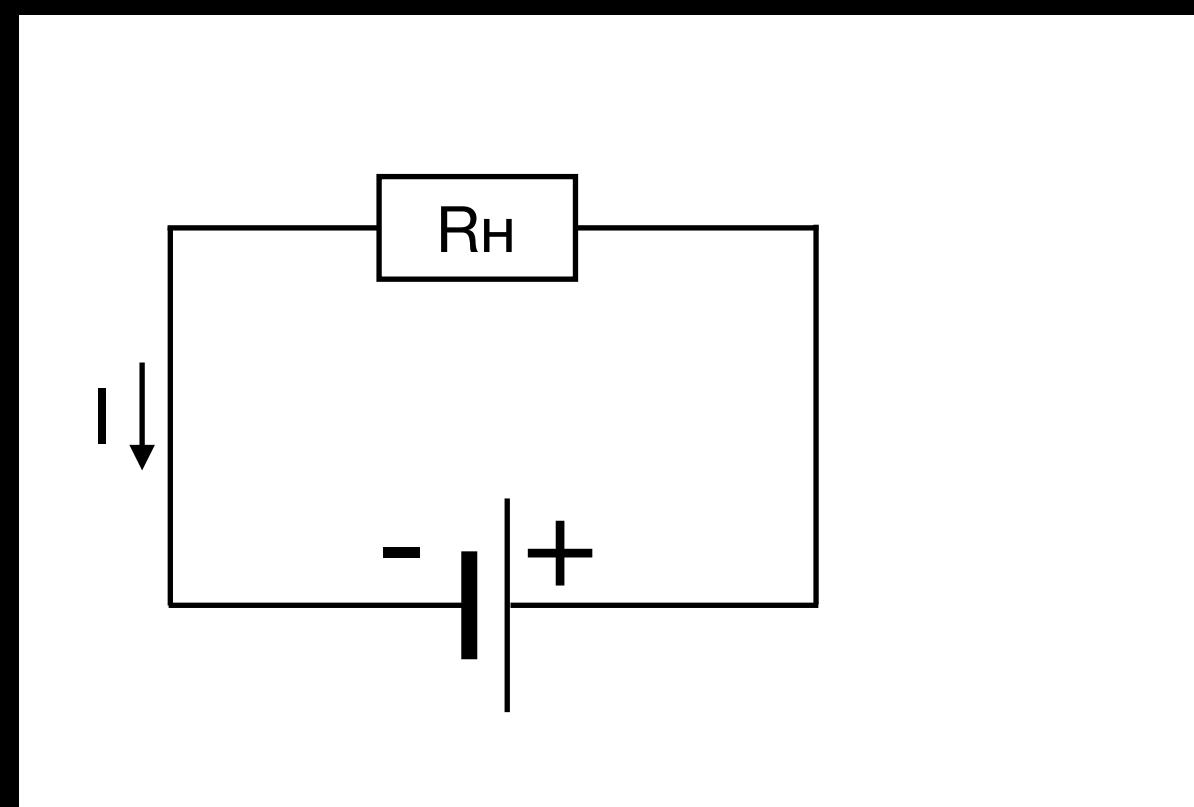
Токовый шунт



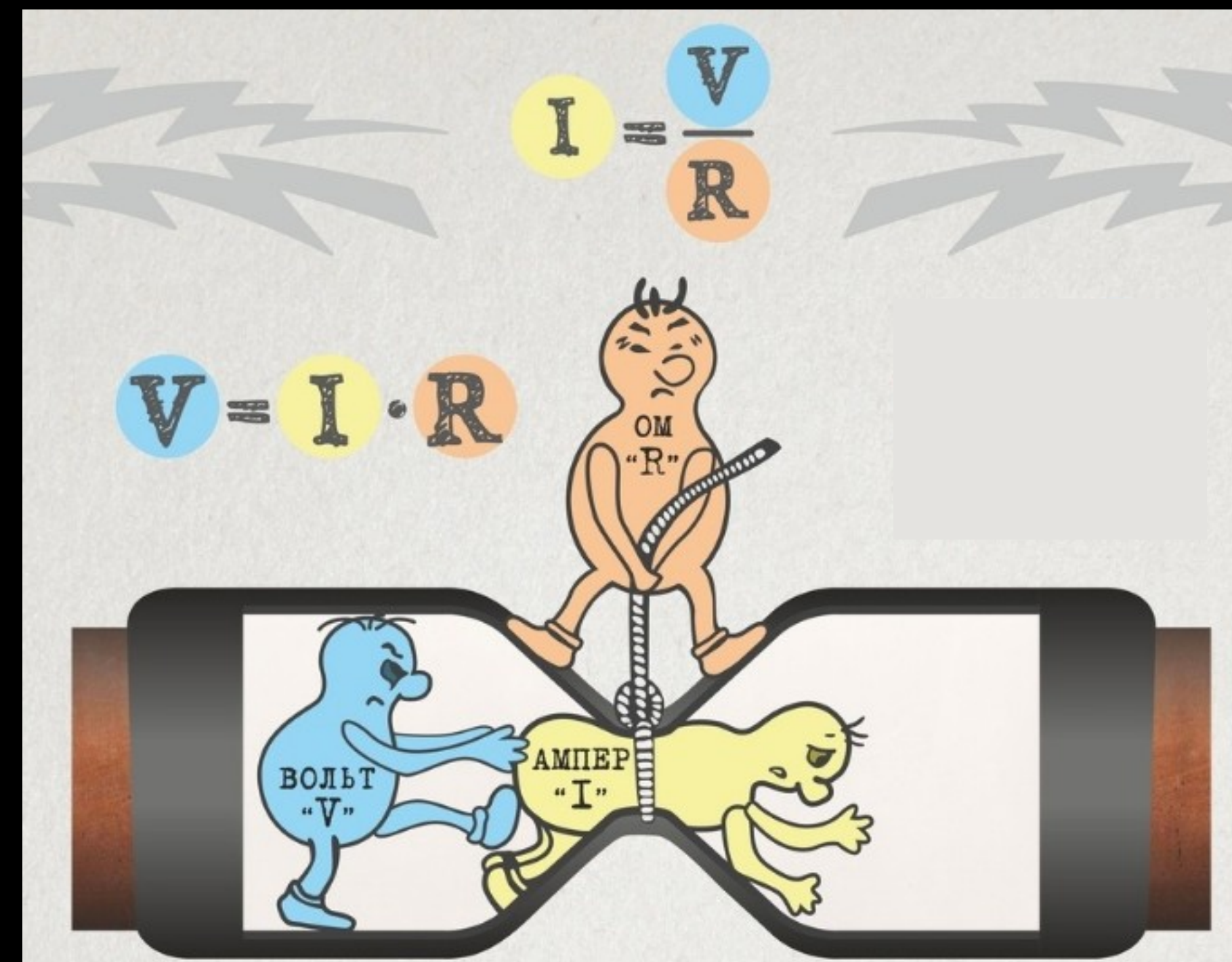
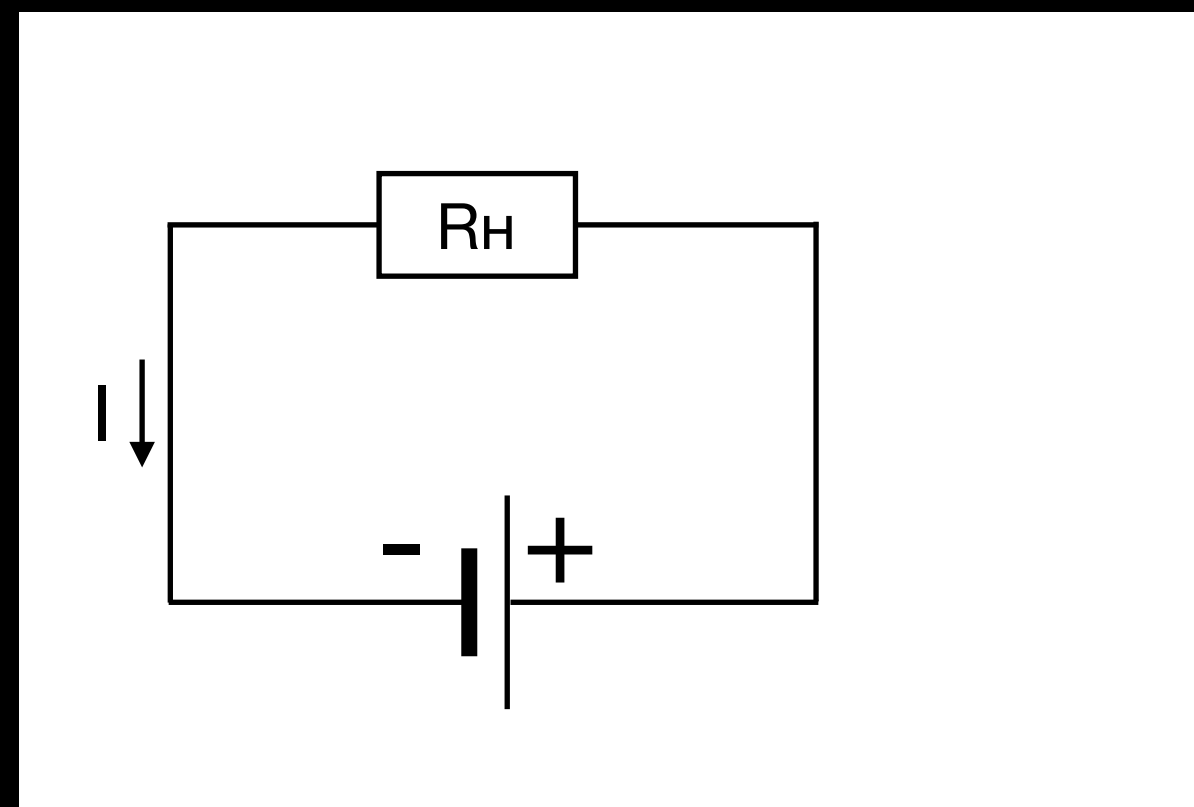
Токóвый шунт



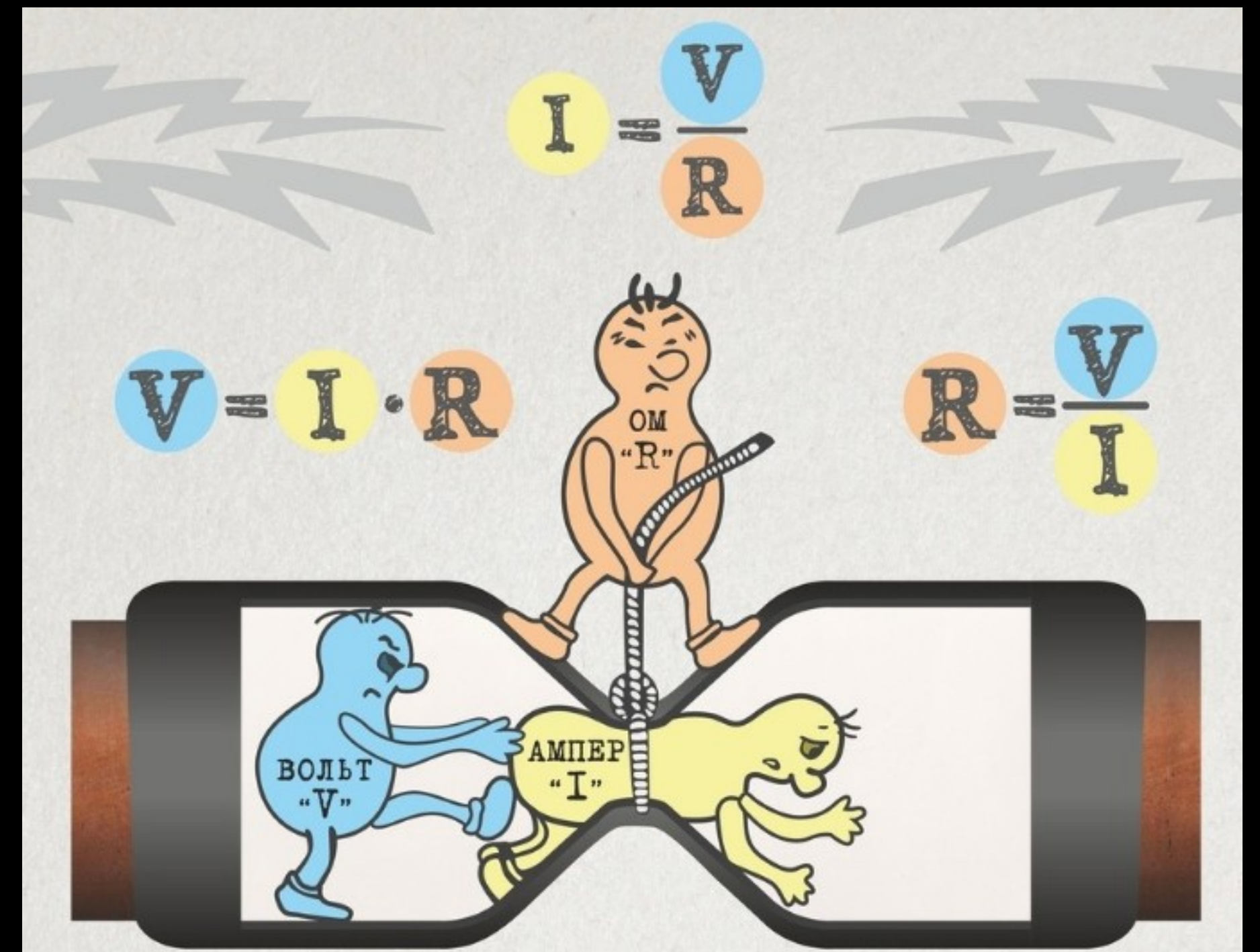
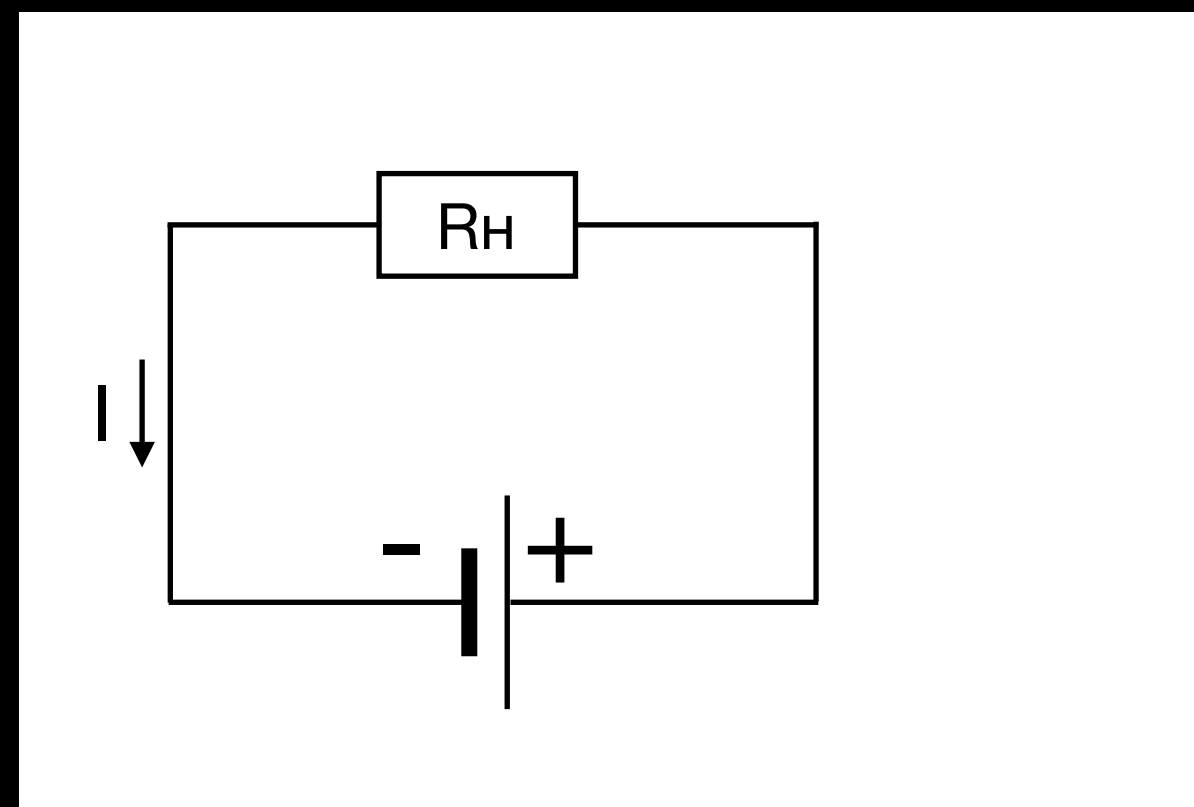
Токóвый шунт



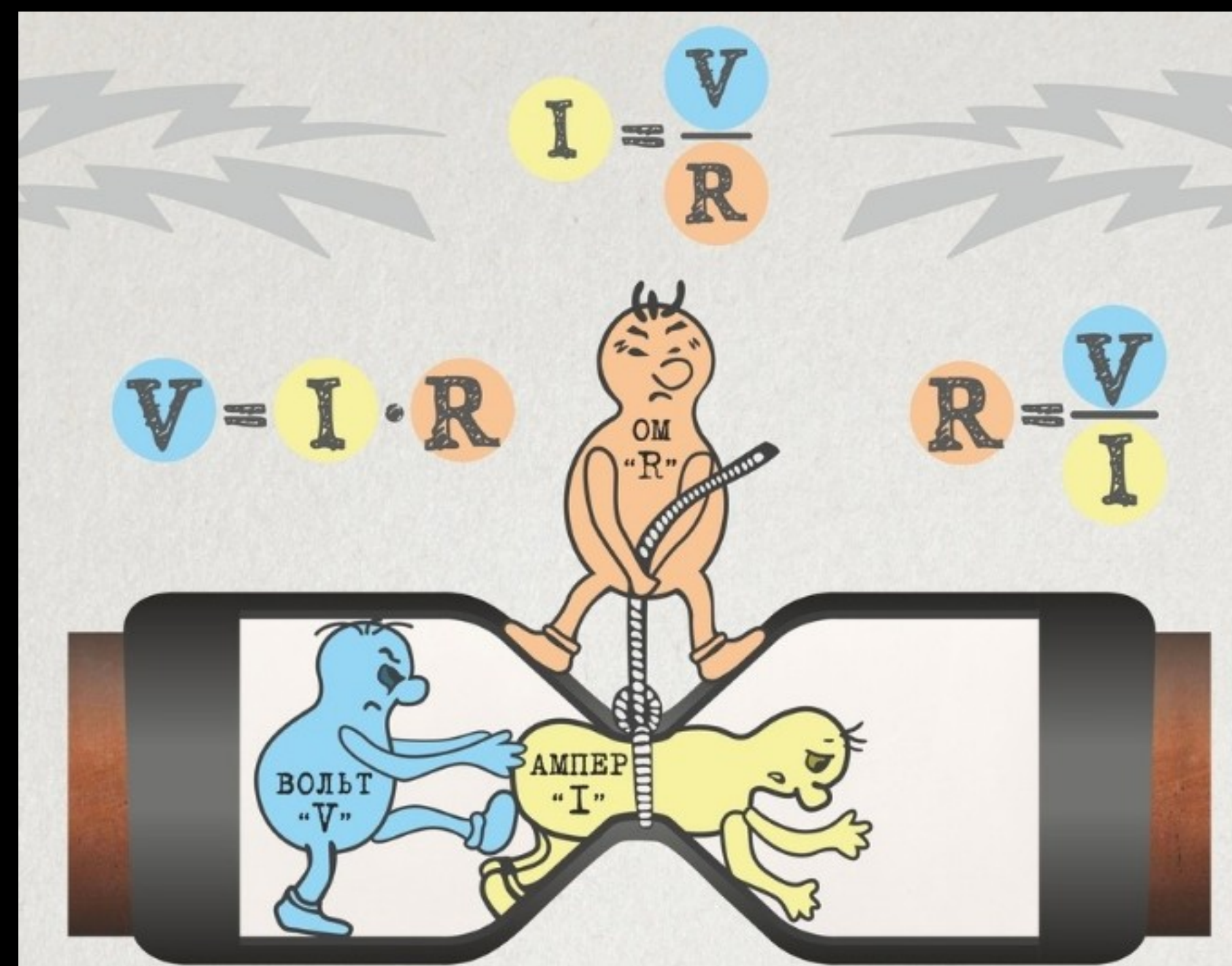
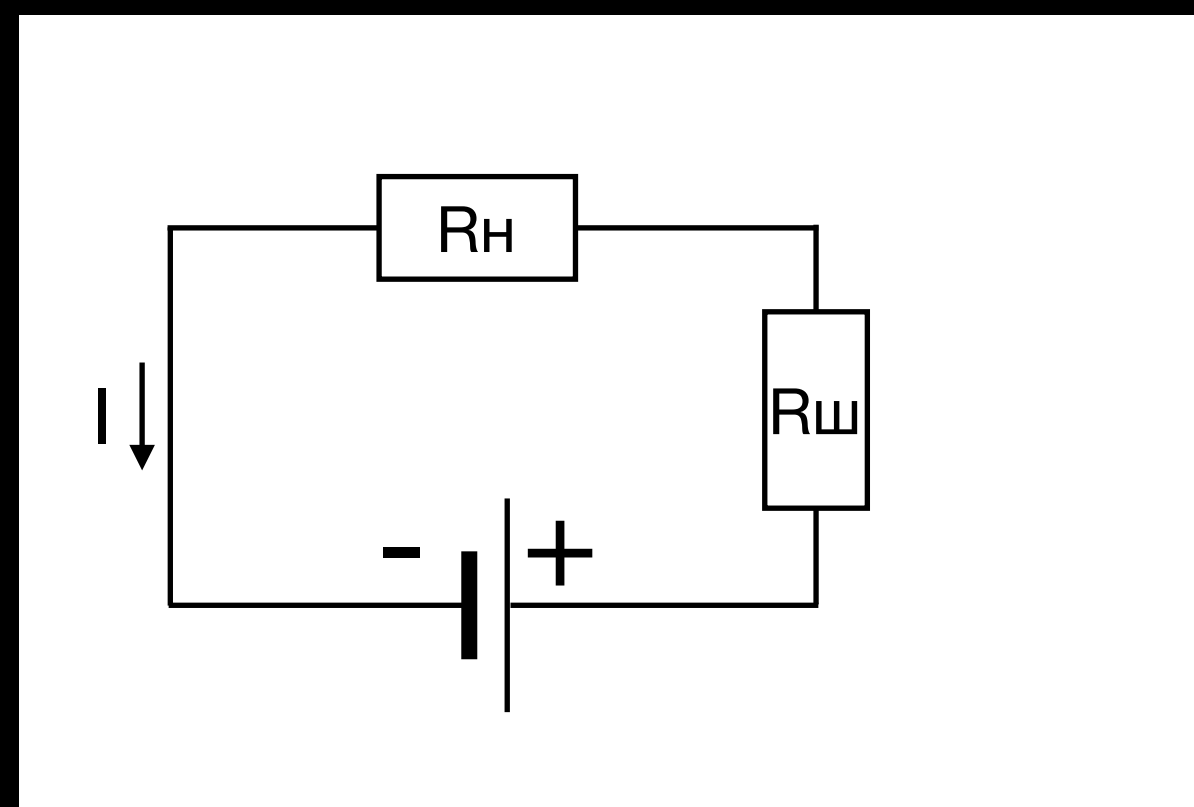
ТОВО́ЫЙ ШУНТ



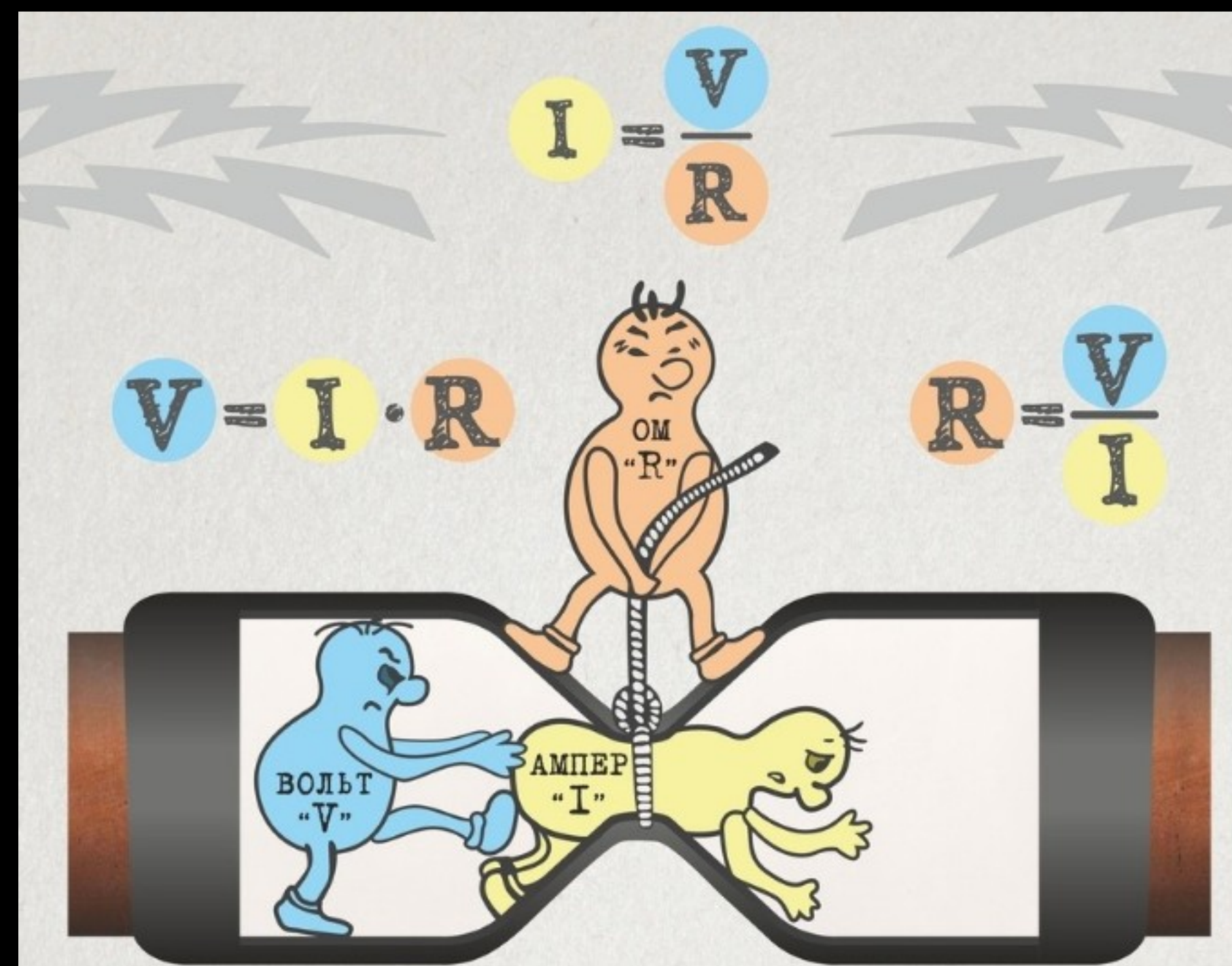
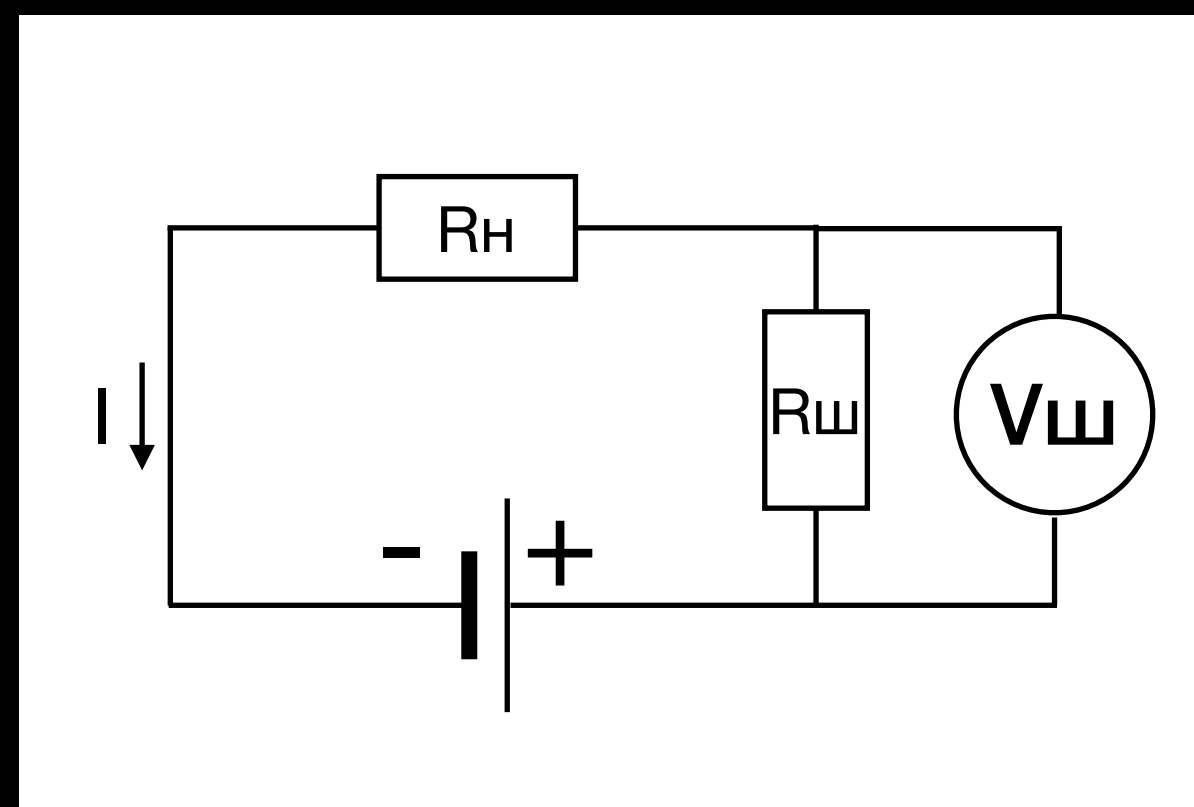
Токóвый шунт



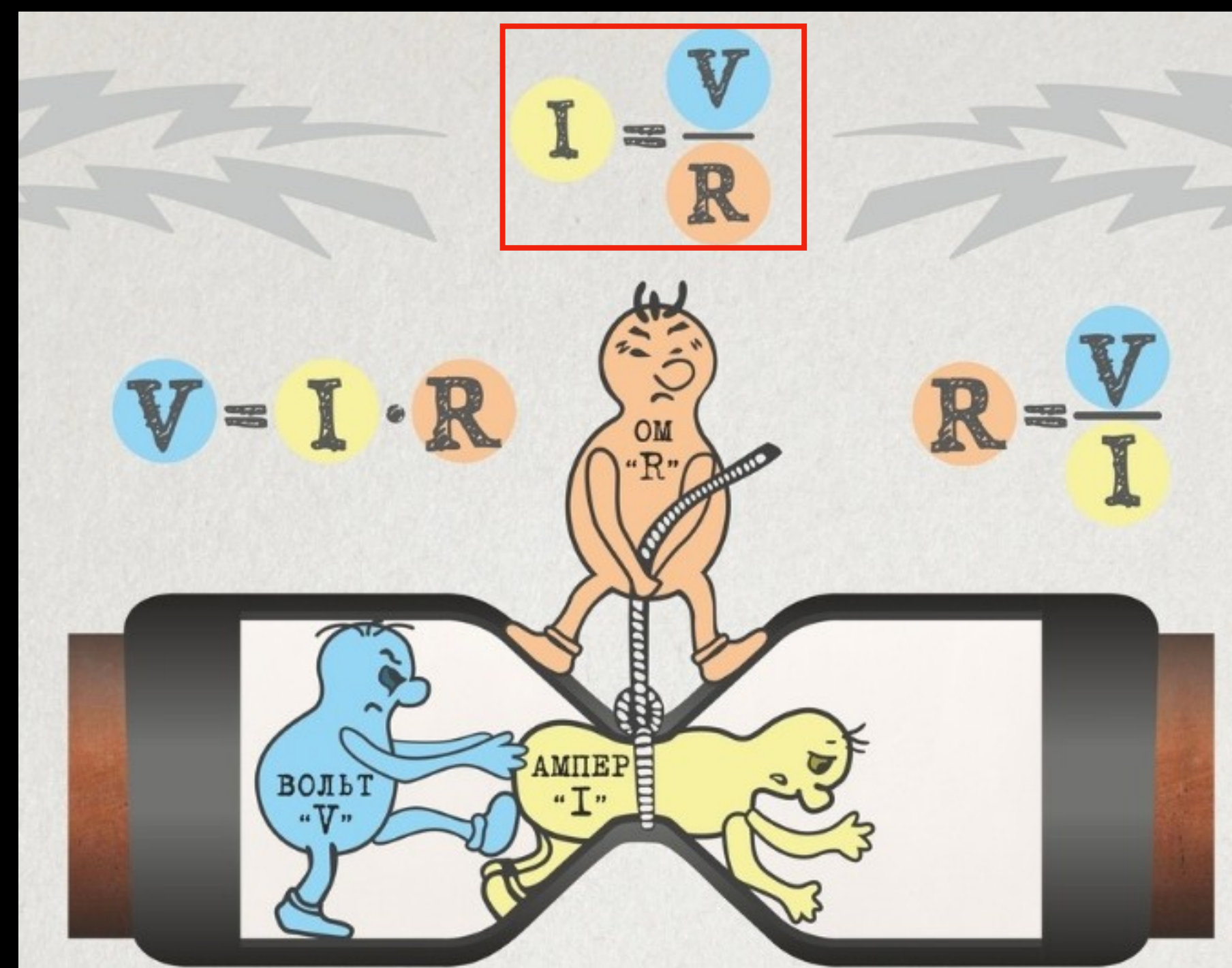
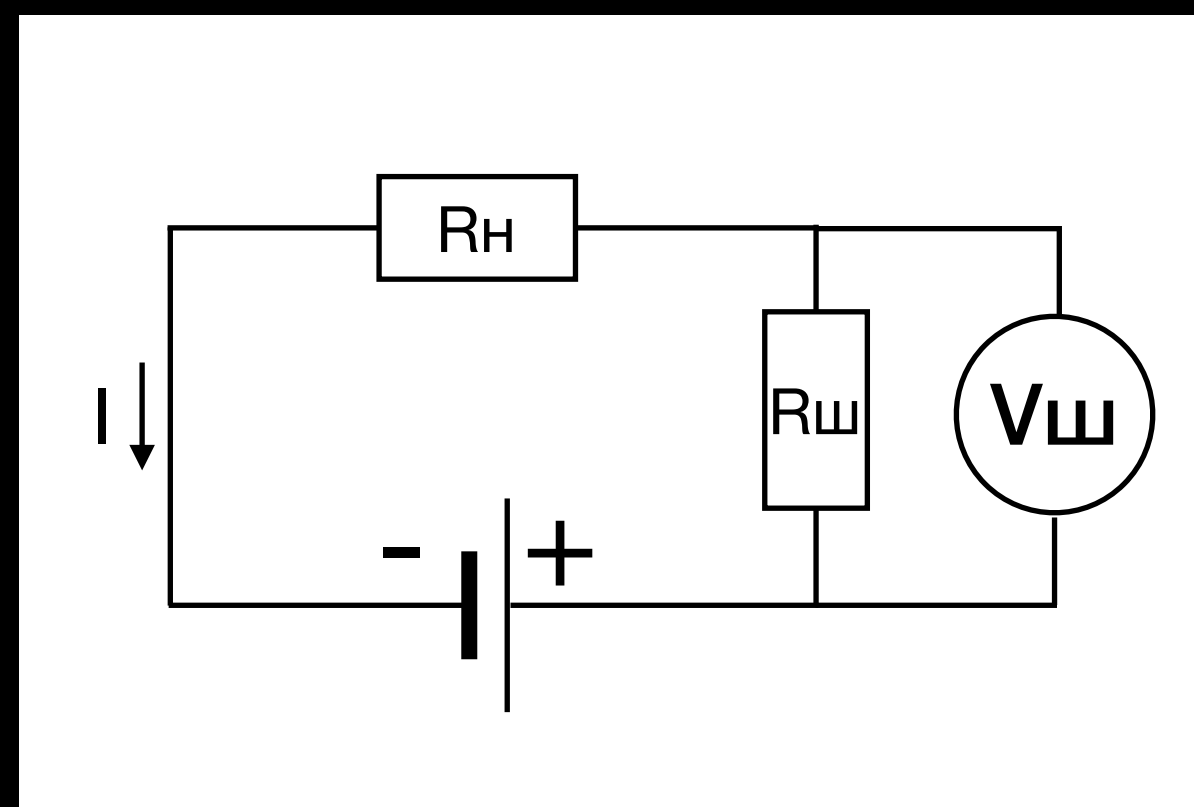
Токóвый шунт



Токóвый шунт



Токóвый шунт



ОСНОВЫ

- $I = Q / \Delta t$
- $Q = I * \Delta t$
- $Q = \sum_{i=1}^n I_i \cdot \Delta t$ //(1000 mAh)

% заряд

% заряд

- Табличные значения напряжения

% заряд

- Табличные значения напряжения
- Подсчет пройденного тока

% заряд

- Табличные значения напряжения
- Подсчет пройденного тока
- BMS

% заряд

- Табличные значения напряжения
- Подсчет пройденного тока
- BMS



% заряд

- Табличные значения напряжения
- Подсчет пройденного тока
- BMS
- Не существует точной методики



Методика измерения mAh (Q)

- $\Sigma = I * \Delta t$
- BMS считает протекций заряд
- % - BMS считает Q/Q_{full}
- Не учитывает особенности с параллельными ячейками

Основные характеристики Pixel 9

Характеристика	Значение
Дисплей	OLED, 6,3 дюйма, 1080 × 2424, 120 Гц, до 2700 нит
Процессор	Google Tensor G4 (4 нм)
Оперативная память	12 ГБ LPDDR5X
Внутренняя память	128 / 256 ГБ UFS 3.1
Основная камера	50 Мп OIS + ультраширокоугольная 48 Мп
Фронтальная камера	10,5 Мп
Батарея	4700 мА·ч, зарядка 27 Вт, беспроводная 15 Вт
ОС	Android 14, поддержка обновлений до Android 21
Размеры и вес	152,8 × 72 × 8,5 мм, 198 г
Защита	Gorilla Glass Victus 2, водозащита IP68

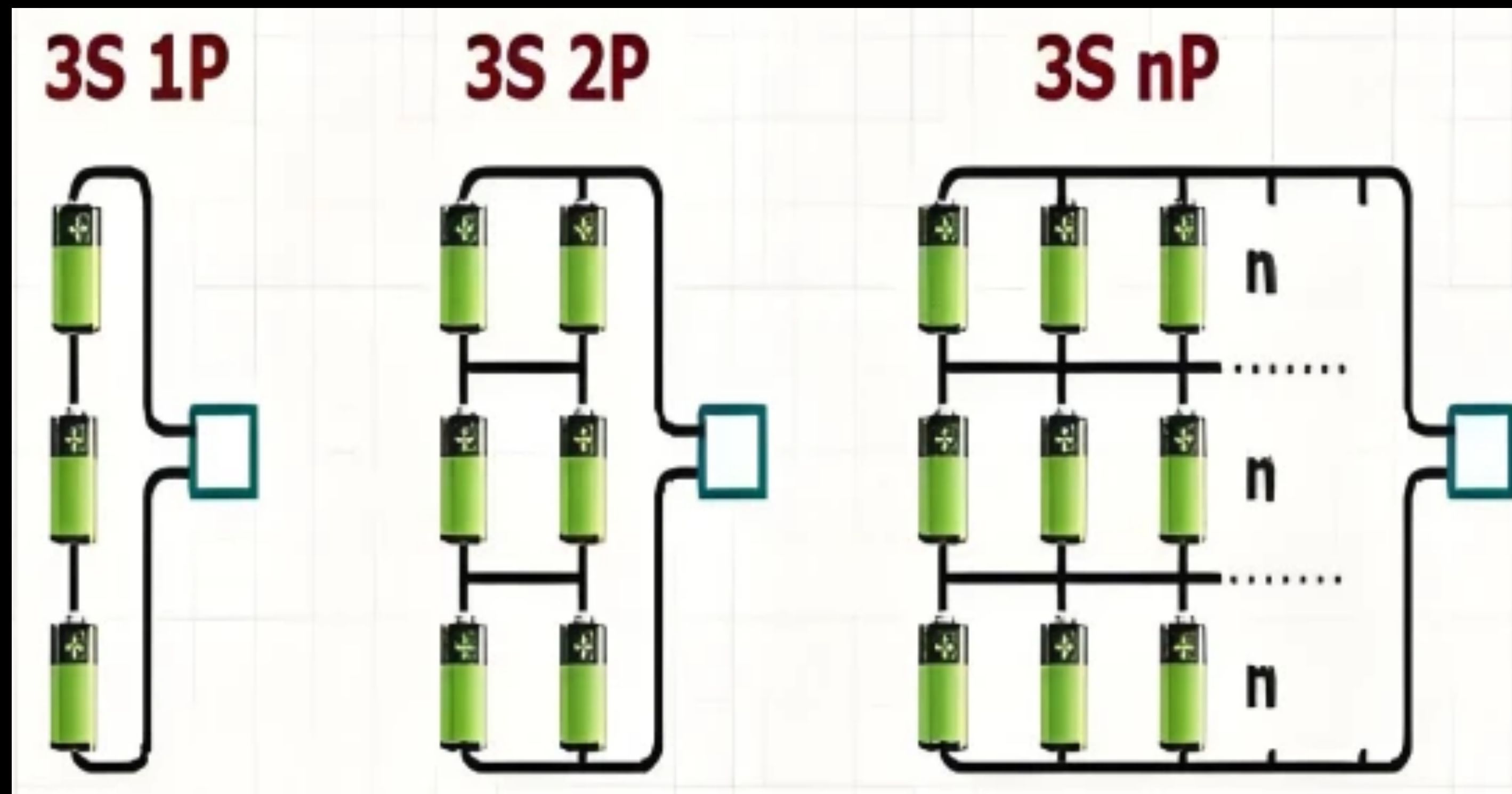


Основные характеристики Pixel 9

Характеристика	Значение
Дисплей	OLED, 6,3 дюйма, 1080 × 2424, 120 Гц, до 2700 нит
Процессор	Google Tensor G4 (4 нм)
Оперативная память	12 ГБ LPDDR5X
Внутренняя память	128 / 256 ГБ UFS 3.1
Основная камера	50 Мп OIS + ультраширокоугольная 48 Мп
Фронтальная камера	10,5 Мп
Батарея	4700 мА·ч, зарядка 27 Вт, беспроводная 15 Вт
ОС	Android 14, поддержка обновлений до Android 21
Размеры и вес	152,8 × 72 × 8,5 мм, 198 г
Защита	Gorilla Glass Victus 2, водозащита IP68



S и P параметры



Методика измерения Wh (А)

Методика измерения Wh (А)



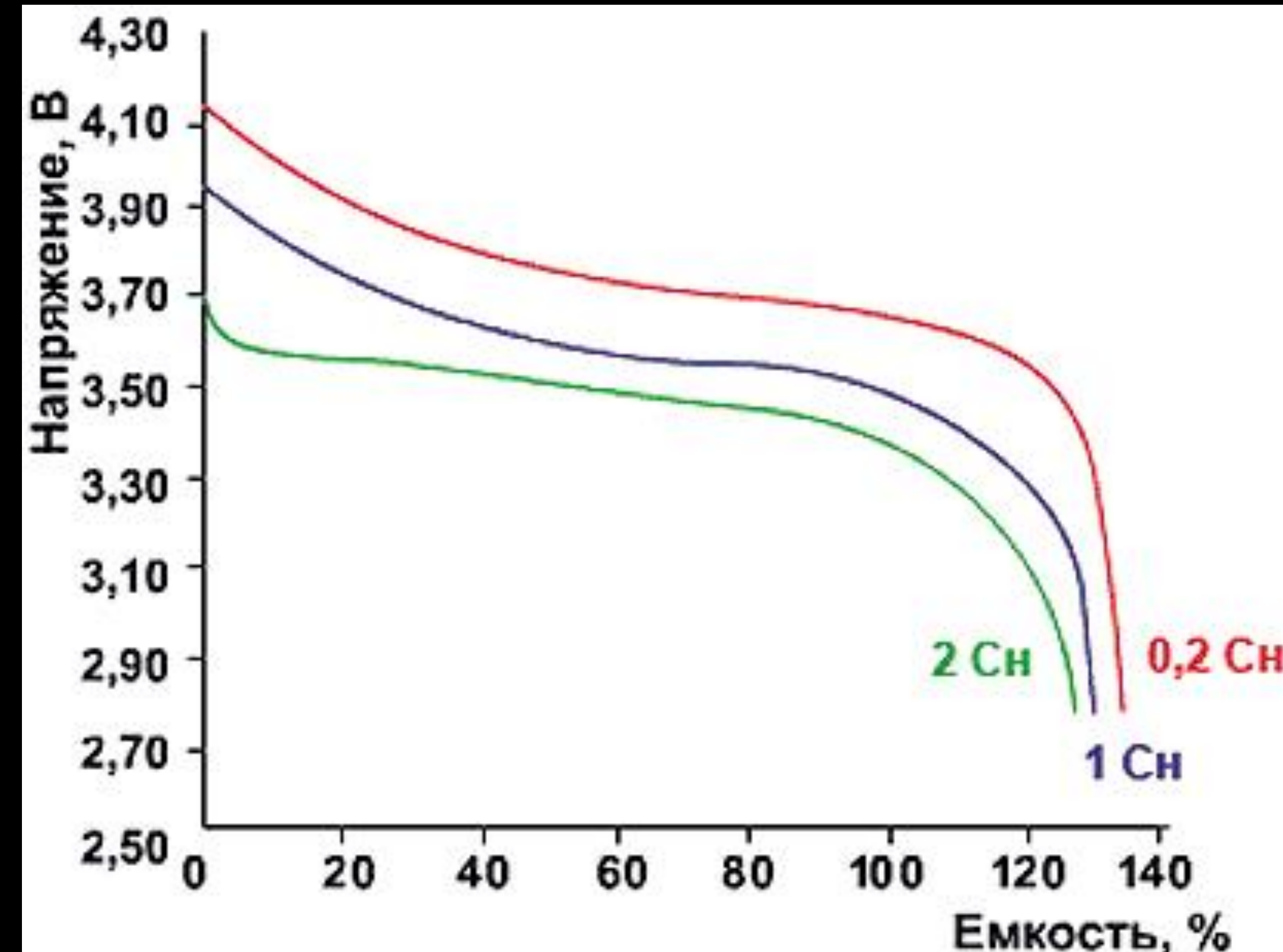
Методика измерения Wh (А)

- $P = I * U$
- $A = P * \Delta t // \text{Дж} = \text{Вт} * \text{с}$
- $Q = I * \Delta t$
- $A = Q * V_{\text{ном}} // \text{Вт} * \text{ч}$
- 37 Wh - 37 W в течение часа или 3,7 W в течение 10 часов



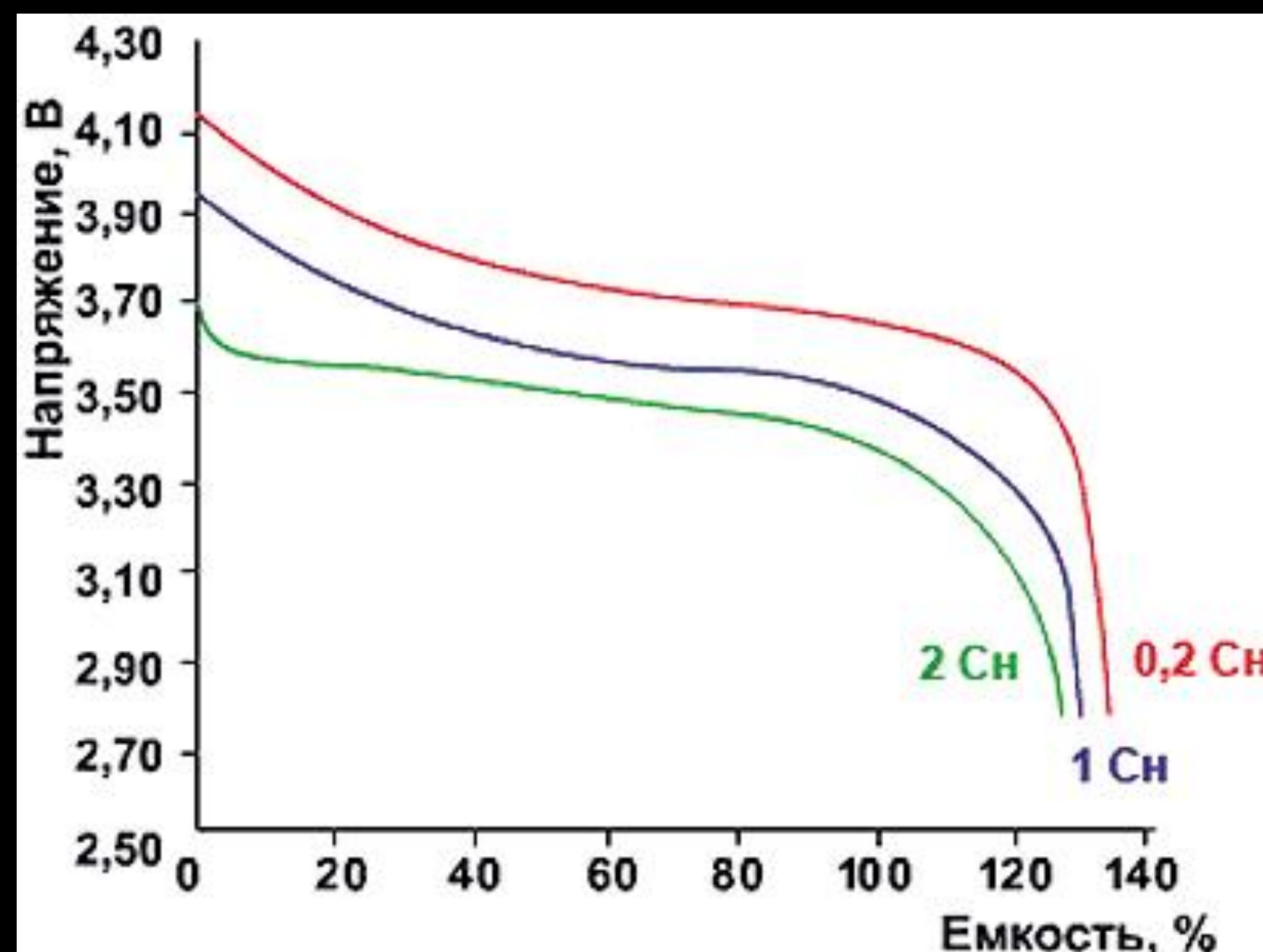
ОСНОВЫ

- Li-ion, Li-Po, Li-Hv, Ni-Mh, Li-Fe, Li-Ti...
- Диапазон напряжений (номинальное напряжение)
- Ёмкость (mAh, Wh)
- Температура заряда и эксплуатации



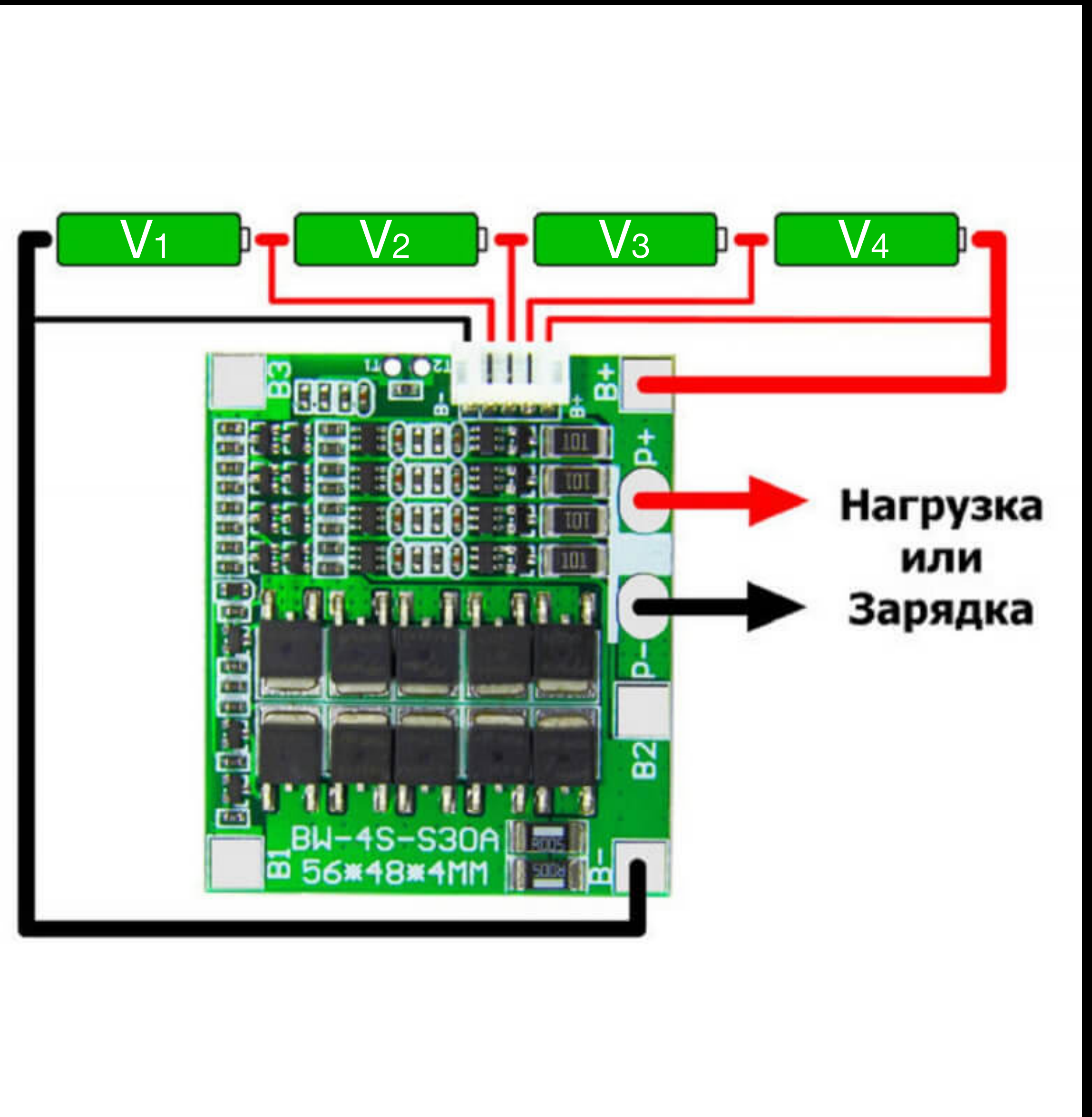
Напряжение

- Li-ion
- Номинальное 3,6 В
- Диапазон [4,2..3,0] В
- Нельзя выходить за границы



BMS

- Отключает нагрузку
- Отключает зарядку
- Следит за температурой *
- Балансирует ячейки *

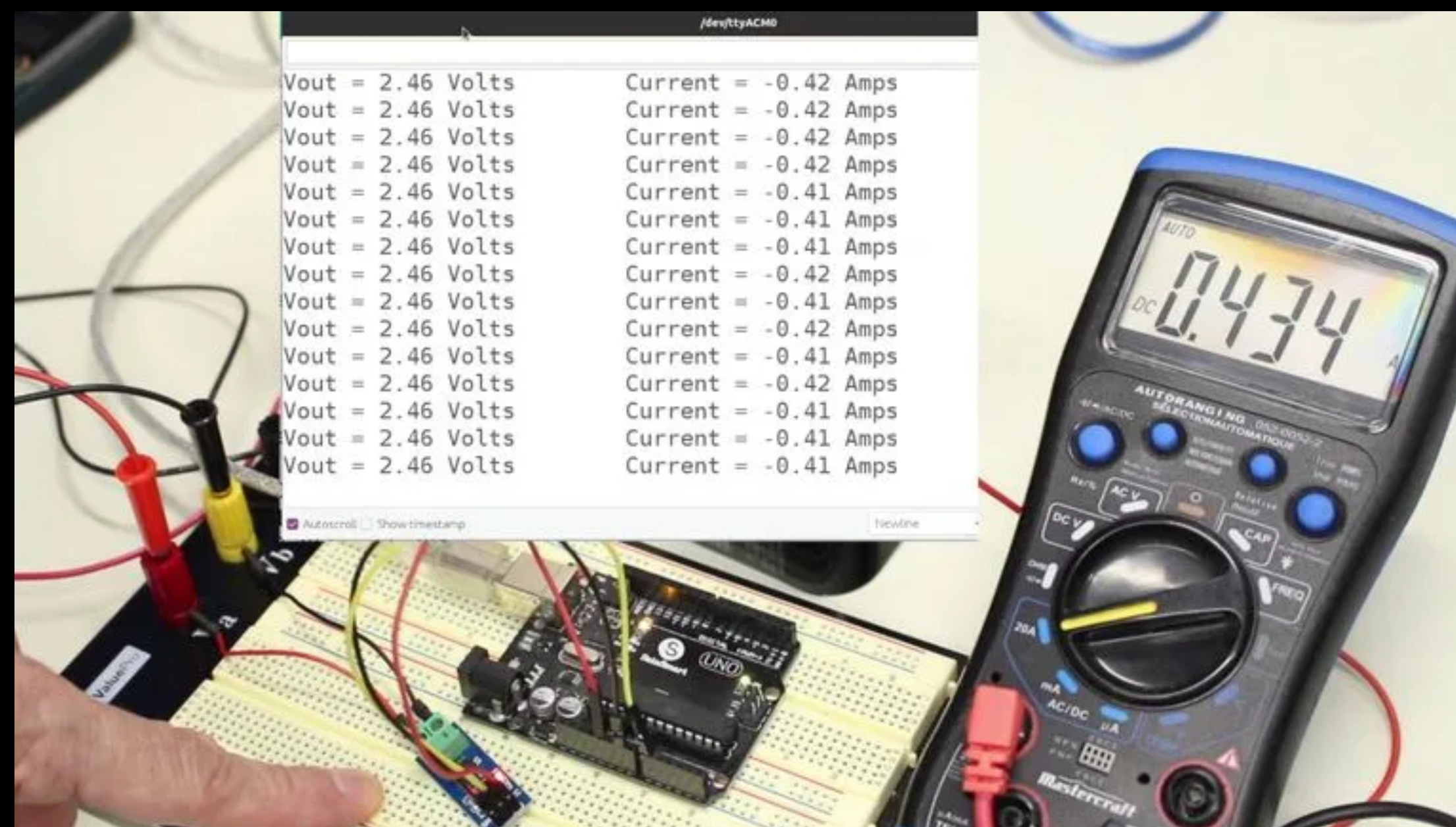
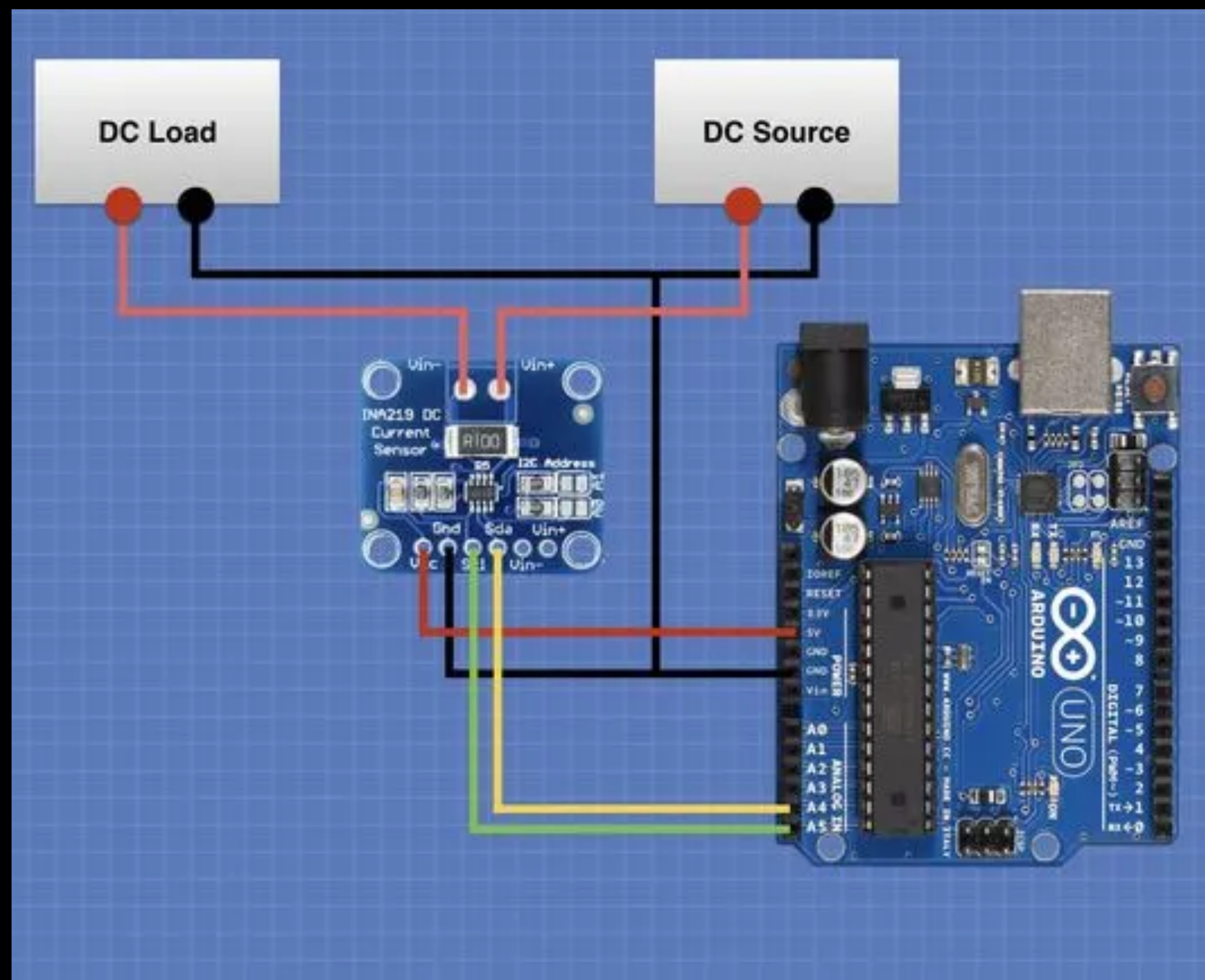


Итоги по основам

- Основные параметры аккумуляторов
- Способы измерения тока и напряжения
- Q // mAh, A // Wh
- % - не значит ничего, BMS - наше всё!

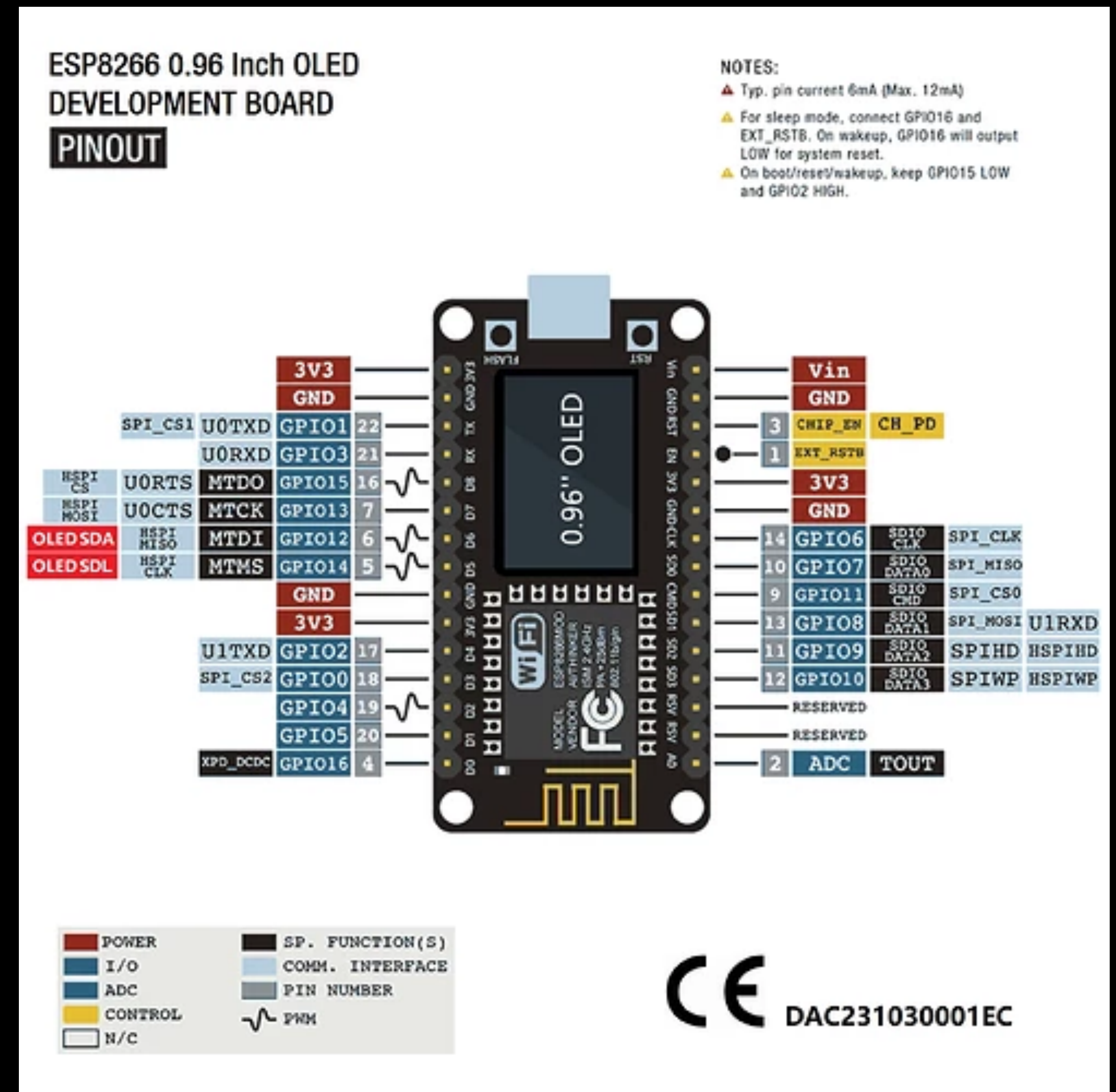
Выбор компонентов

Выбор компонентов



Выбор компонентов

- INA219, INA226, INA231
- ESP8266
- SSD1306



Выбор компонентов

Характеристика	INA219	INA226	INA228	INA231
Основное назначение	Монитор тока/ мощности	Монитор тока/ мощности	Монитор тока/ мощности/ энергии	Монитор тока/ мощности
Разрешение АЦП	12-бит	16-бит	20-бит	16-бит
Диапазон напряжений (Common Mode)	0 ... +26 В	0 ... +36 В	-0.3 ... +85 В	0 ... +28 В
Диапазон измерения шунта ($\pm V_{sense}$)	$\pm 40 / \pm 80 / \pm 160 / \pm 320$ мВ (программируется)	± 81.92 мВ	± 163.84 мВ / ± 40.96 мВ	± 81.92 мВ
Интерфейс связи	I2C / SMBus	I2C / SMBus	I2C / SMBus (High Speed)	I2C / SMBus (1.8V совместимый)
Макс. ток потребления	1 мА	330 мкА	640 мкА	330 мкА (тип.)
Ток в режиме сна	100 мкА	2.5 мкА	5 мкА	100 мкА

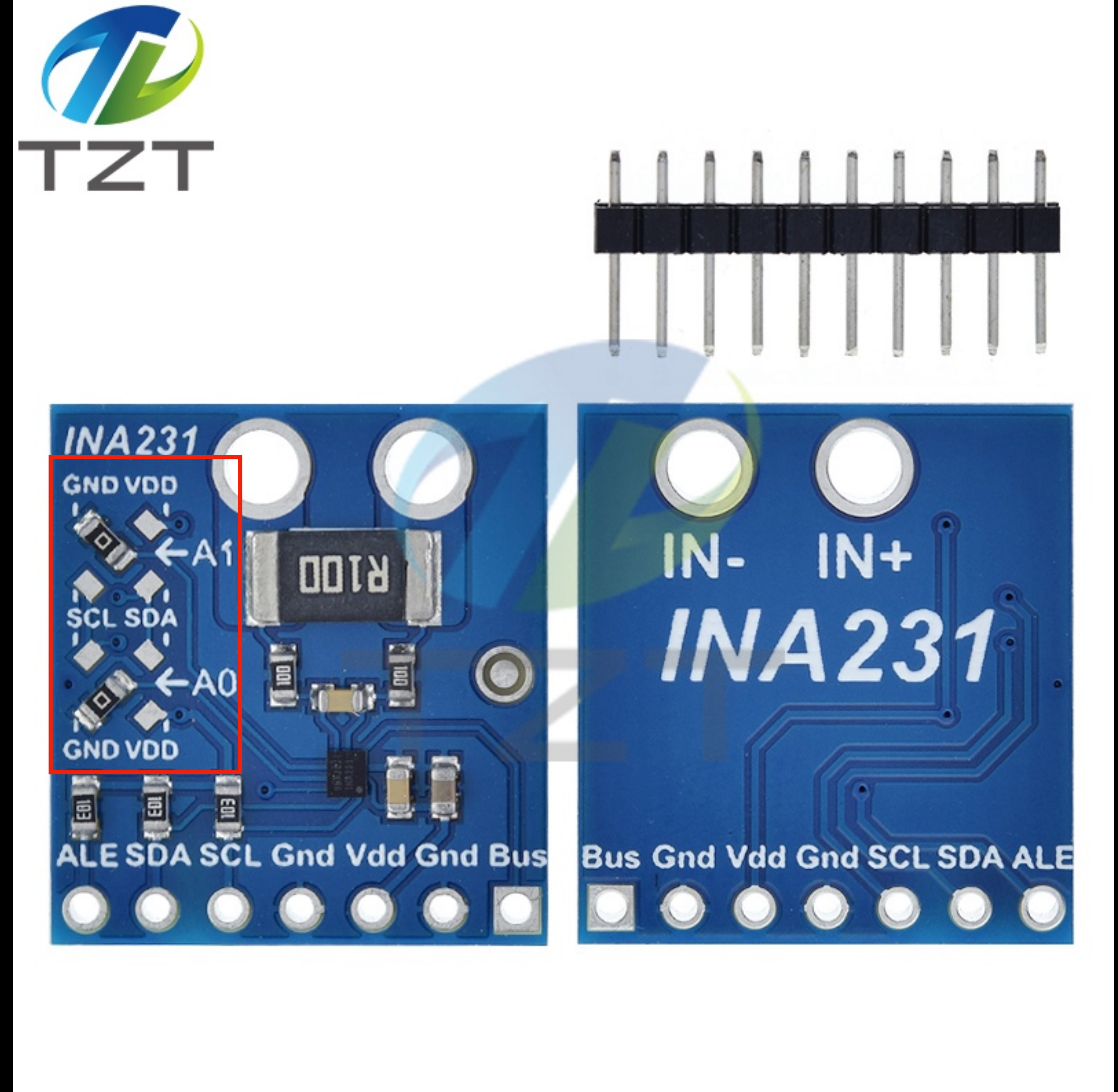
INA231

- 16 бит АЦП
- Пин alert
- 1.8V I2C
- 0..28 В
- 0,5% погрешность
- Перемычки

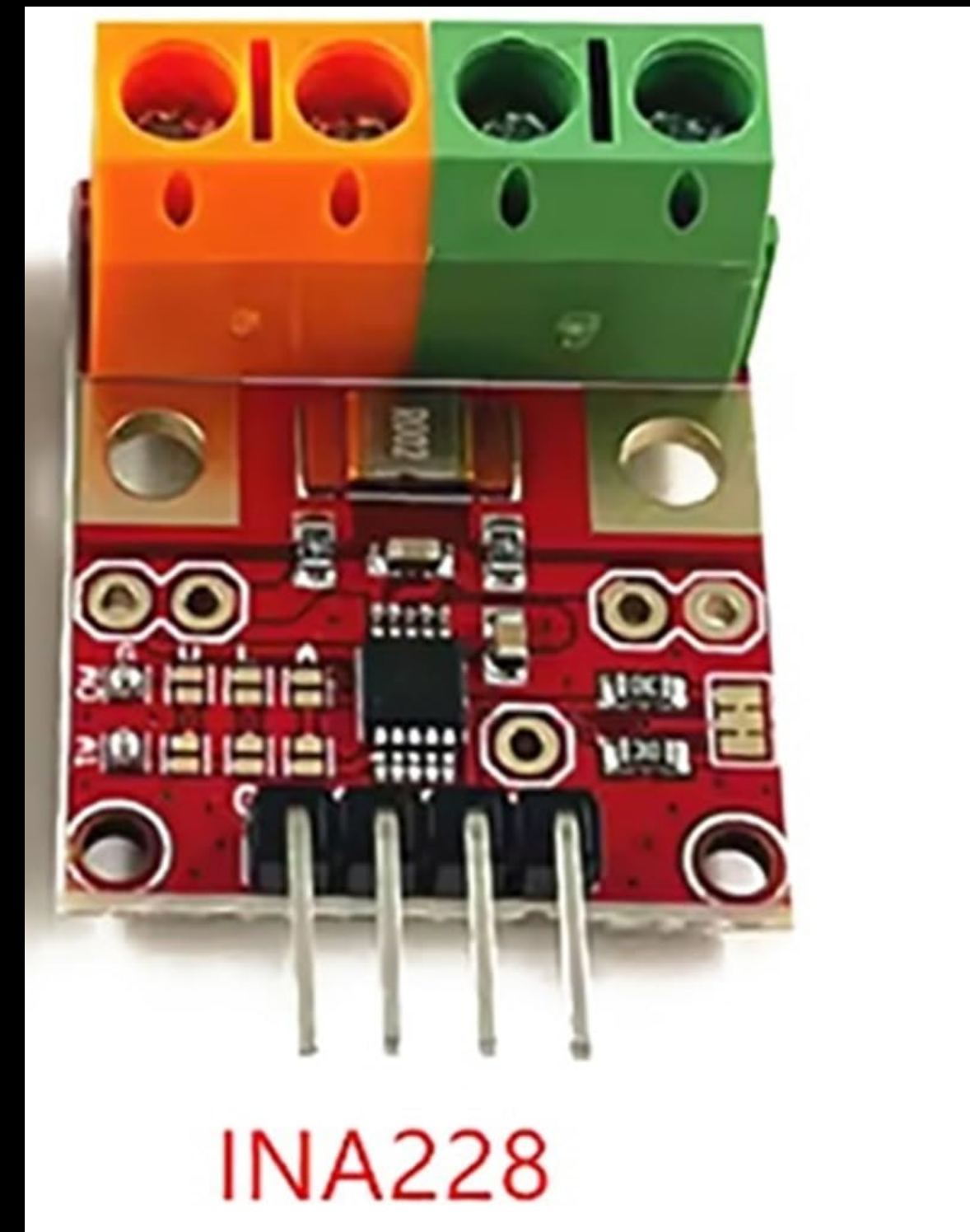


INA231

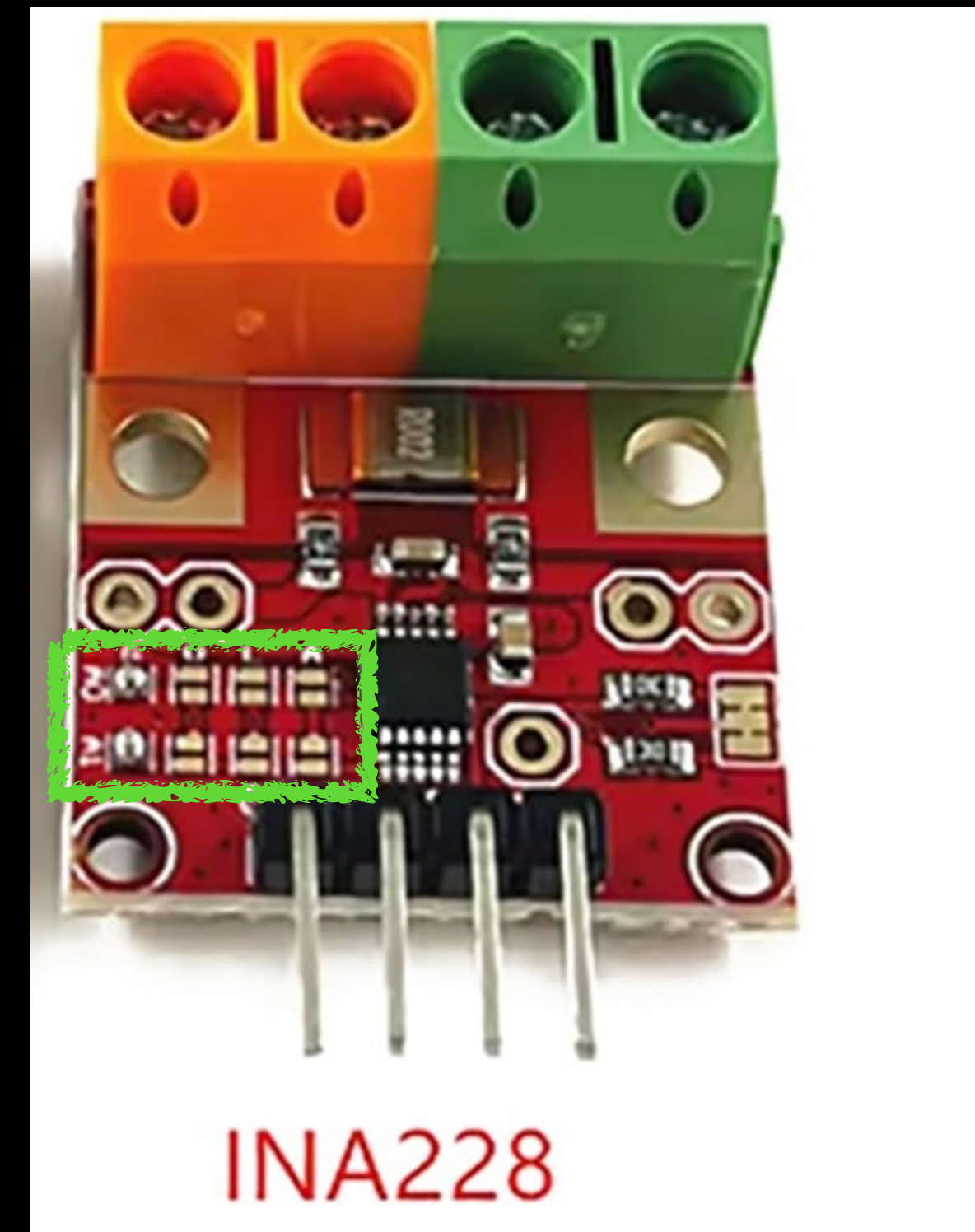
- 16 бит АЦП
- Пин alert
- 1.8V I2C
- 0..28 В
- 0,5% погрешность
- Перемычки



INA228

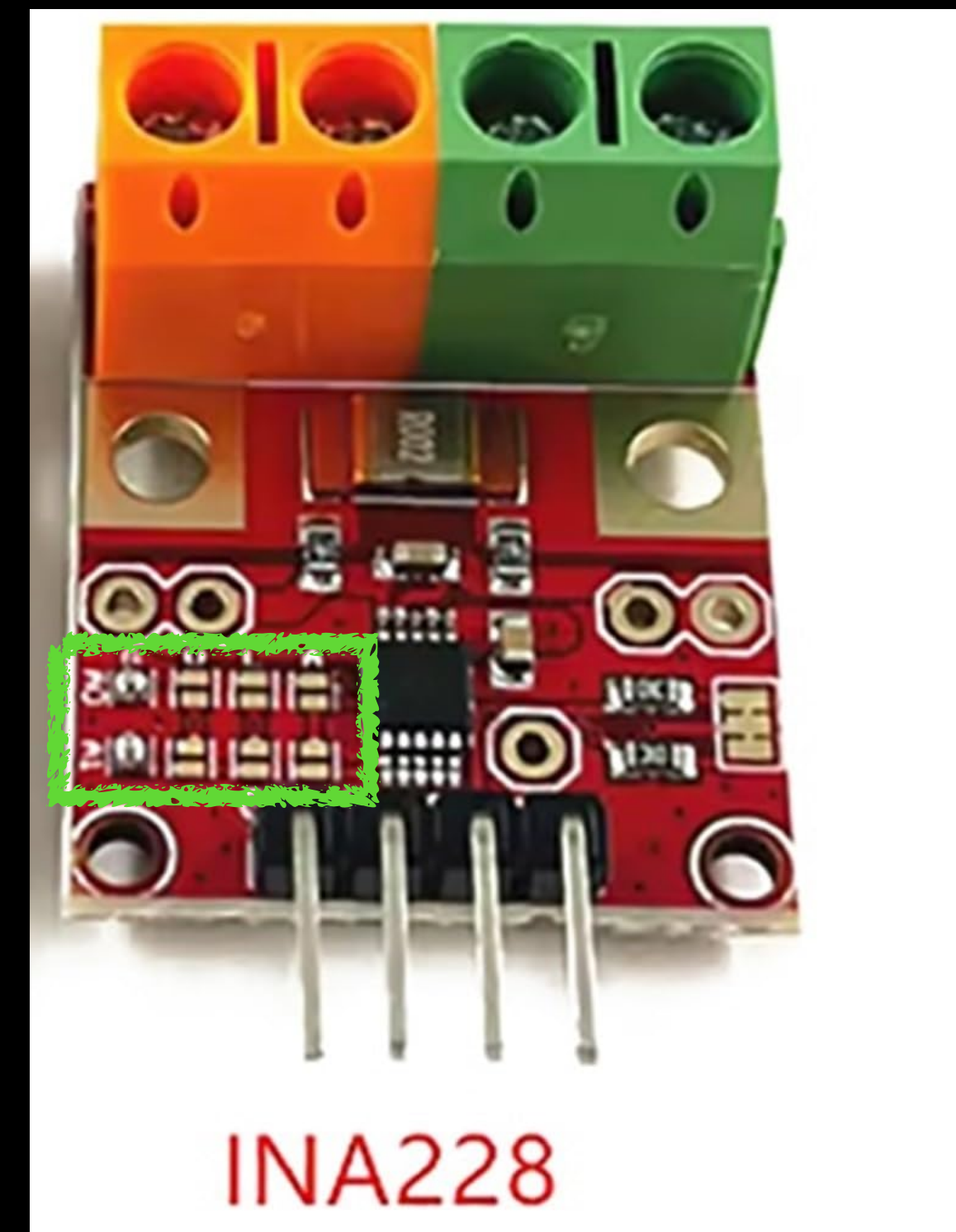


INA228



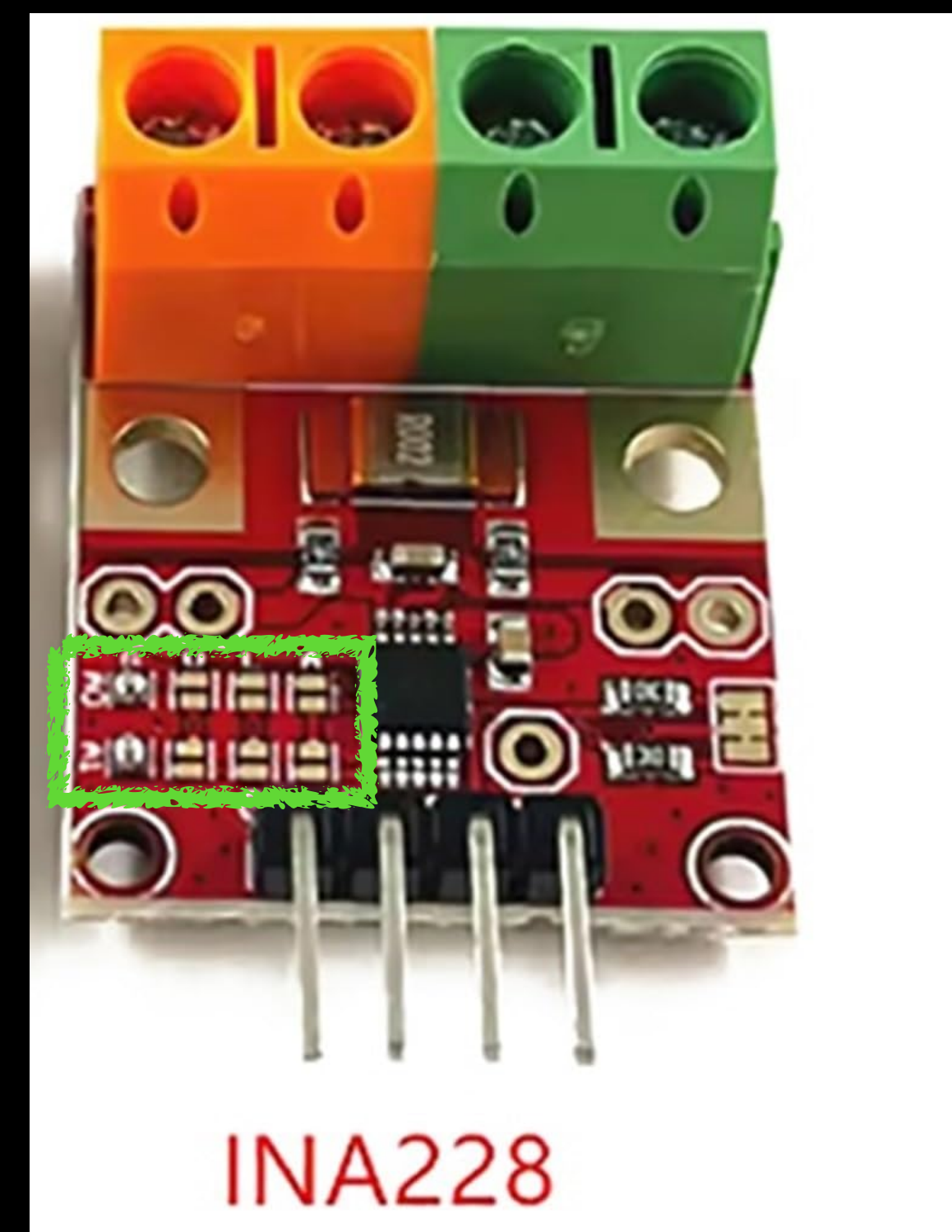
INA228

- АЦП 20-бит



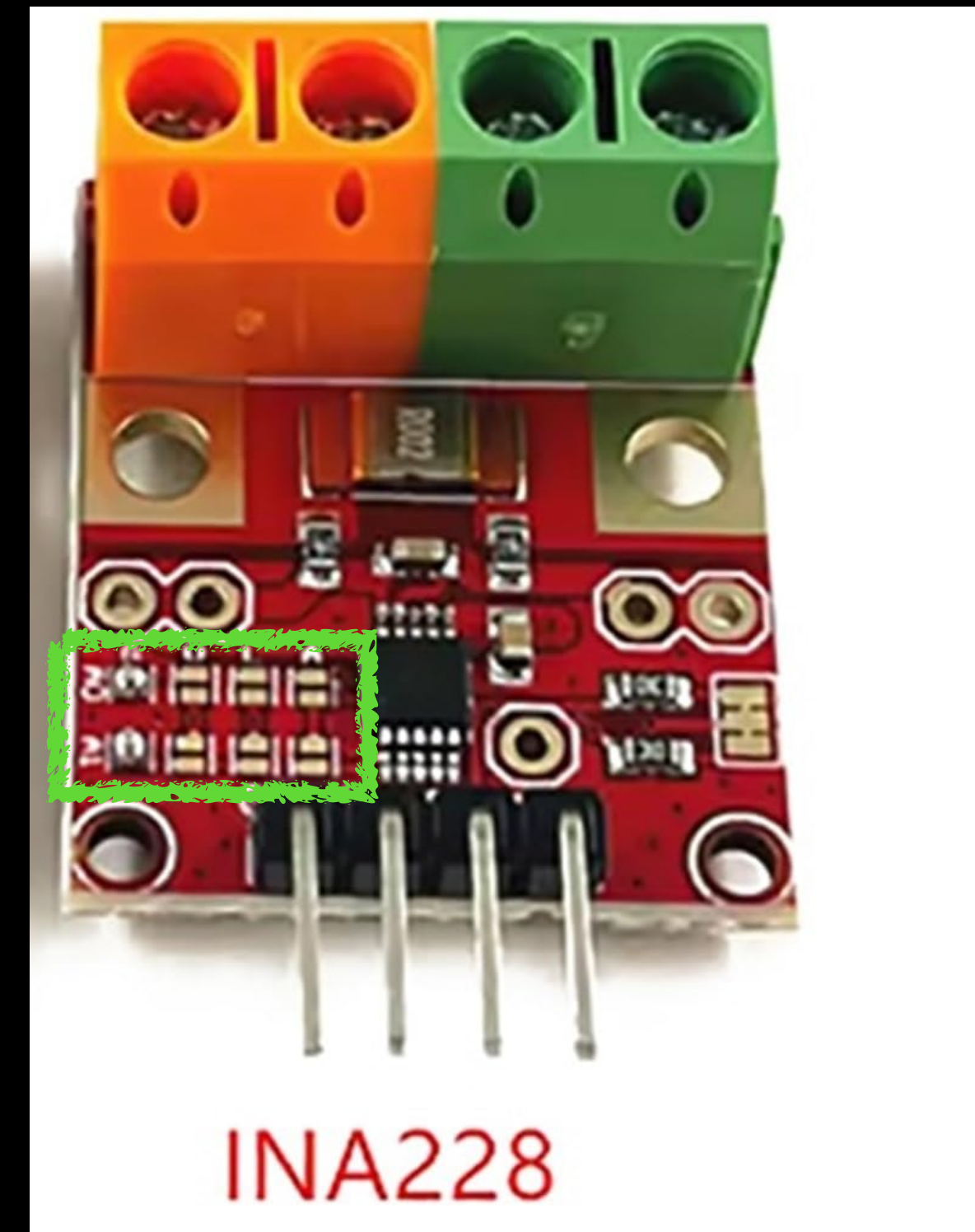
INA228

- АЦП 20-бит
- -0.3 ... +85 В



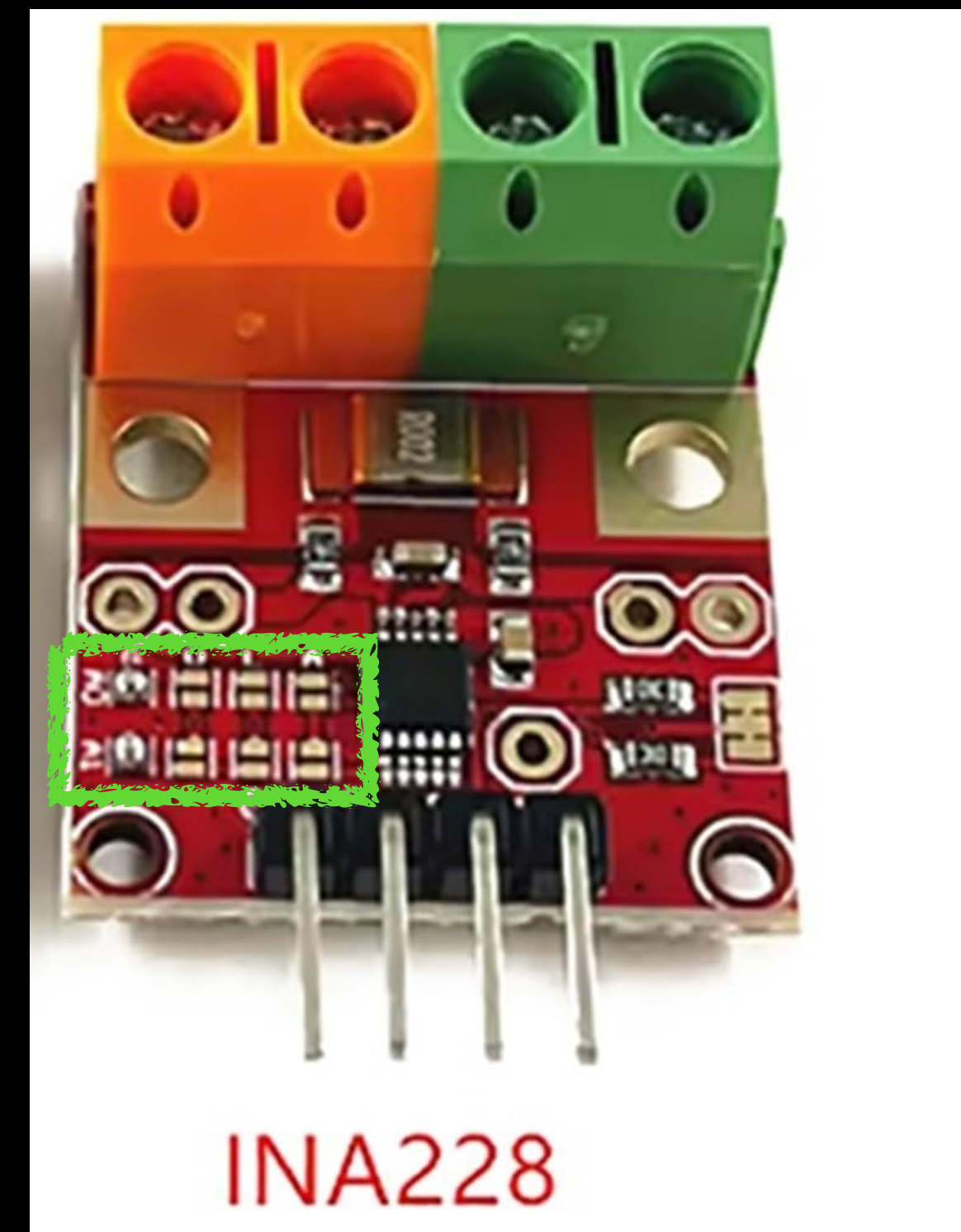
INA228

- АЦП 20-бит
- $-0.3 \dots +85 \text{ В}$
- датчик температуры



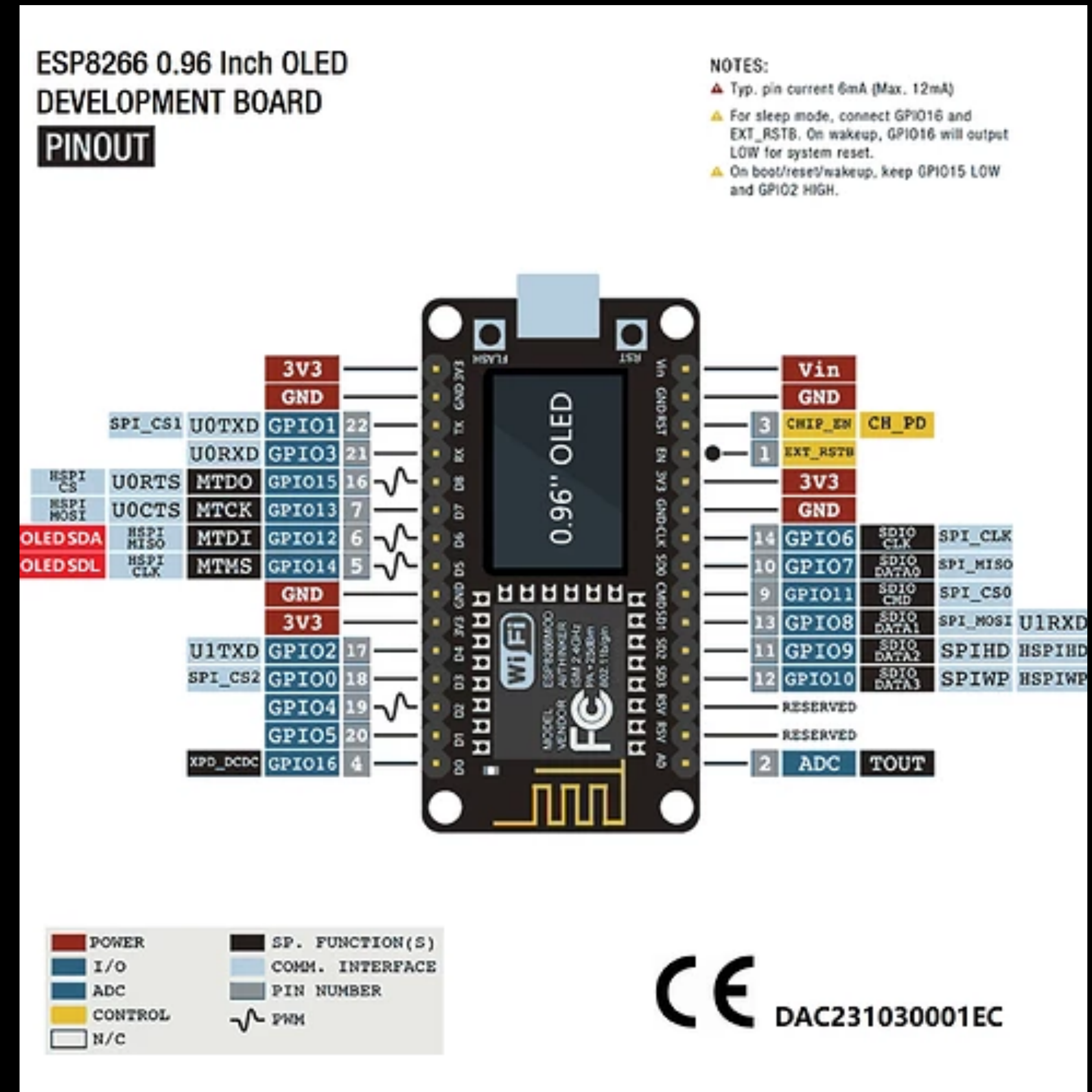
INA228

- АЦП 20-бит
- $-0.3 \dots +85 \text{ В}$
- датчик температуры
- Continuous mode



ESP8266

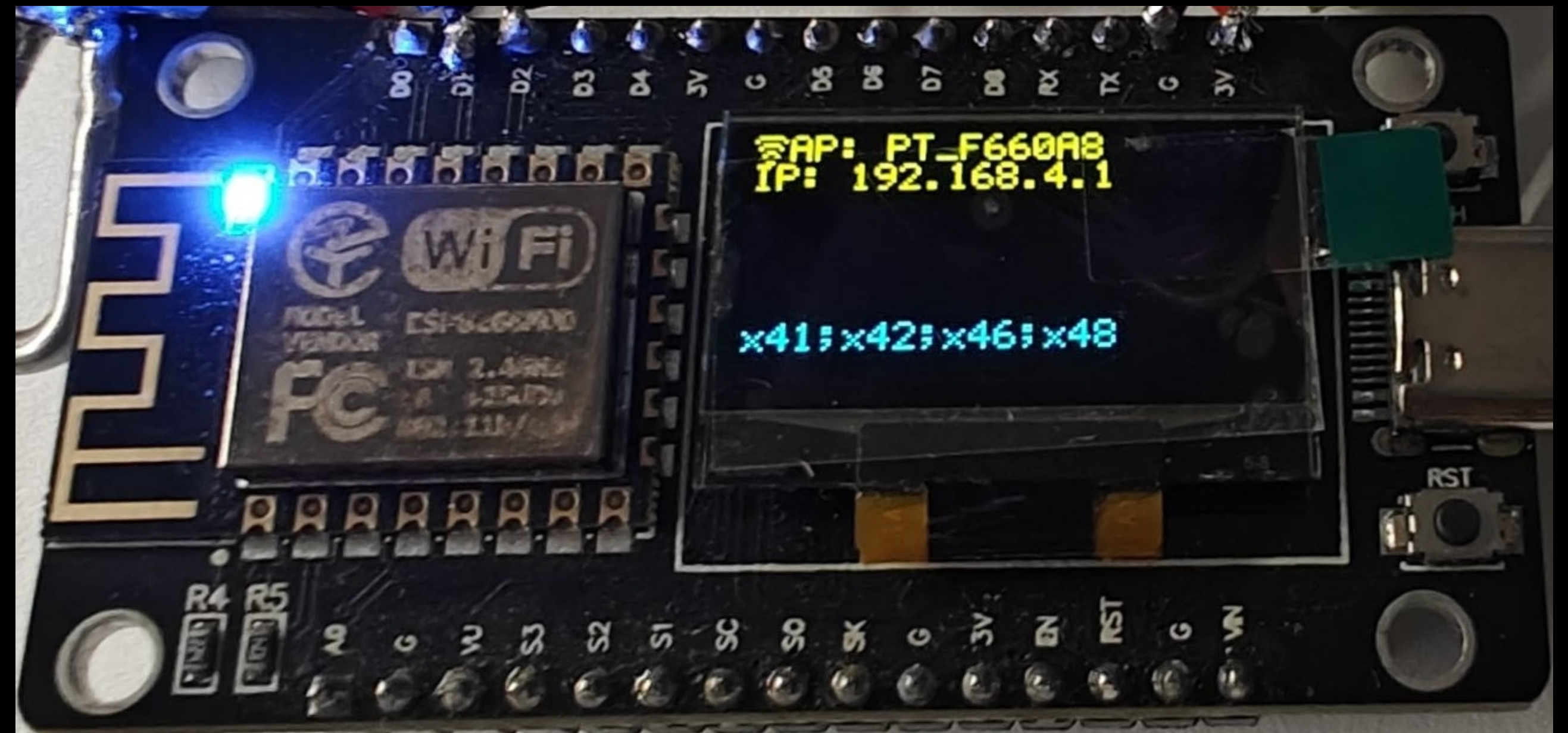
- Wi-Fi
- 4\$
- 80-160 МГц
- 80 кБ RAM
- FreeRTOS
- HTTP client & server
- OTA

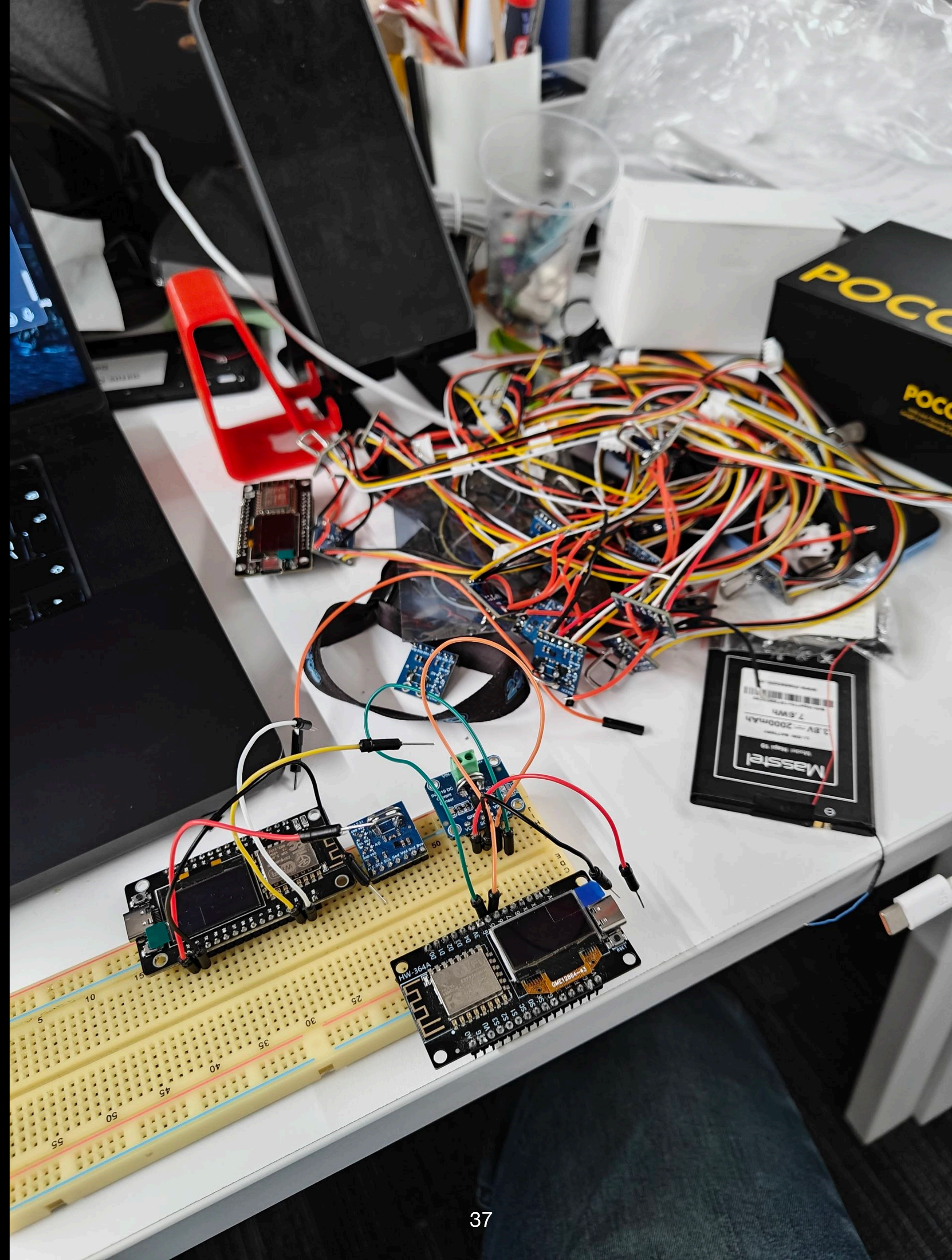


Разработка и интеграция

Разработка и интеграция

- VS Code
- platformio
- Gyver libs
- C++
- CI/CD для МК
- Аппаратная часть
- 3д-печать







Режимы

- Подключение к Wi-Fi
- Полноточечный AP

Web-интерфейс

Power tracker  

0x40 **0x43** 0x44

Device info

Name	Xiaomi Poco X7
OS	Android 15
Serial Number	WH0203684
INA device	INA231
Status	<input type="checkbox"/>



Sensor Status

Capacity, %	100
Voltage, V	4.43
Shunt, mV	0.00
Current, mA	0.92
Power, mW	0.00

[Track](#)

[Settings](#)

Web-интерфейс

Power tracker  

0x40 0x43 0x44

Device info

Name	Xiaomi Poco X7
OS	Android 15
Serial Number	WH0203684
INA device	INA231
Status	<input type="checkbox"/>

Sensor Status

Tracking time	00:00:48
Voltage	4.42 V
Current	0.61 mA
Total current	24.18 mAh
Total energy	0.01 mWh
Max power	7.63 mW
Max current	0.92 mA
Min voltage	4.42 V

[Back](#) [Restart](#)

Web-интерфейс Настройки

- Граф состояний

API

API

- Start
- Stop
- Status
- All

API - Start

- start - запуск замеров

```
curl -X GET "192.168.241.177/start?serial=WH0147641"
```

```
{  
  "operation": "start",  
  "serial": "WH0147641",  
  "result": 1  
}
```

API - Stop

- stop - остановка замеров и получение результата измерений в ответе. При использовании этого метода результаты в файл не сохраняются.

```
curl -X GET "192.168.241.177/stop?serial=WH0147641"
```

```
{  
  "type": "Tracking 0x41",  
  "stateType": 1,  
  "totalTime": 2,  
  "sensorAddress": 65,  
  "totalCurrent": 0.01,  
  "totalPower": 0.00,  
  "maxCurrent": 0.98,  
  "maxPower": 0.00,  
  "minVoltage": 0.00,  
  "result": 1,  
  "operation": "stop",  
  "serial": "SW0123456"  
}
```

API - Status

- status - получение текущего статуса. Необходимо обращать внимание на поле `status`. Если значение `Tracking` - в json будут присутствовать поля по измеренным величинам:

1. Израсходованный ток в **mAh**,
2. Израсходованная мощность в **mWh**,
3. Минимальное (просадка) напряжение в **V**,
4. Пик тока в **mAh**,
5. Пик мощности в **mWt**,
6. Время измерения в **секундах**

```
curl -X GET "192.168.241.177/status?serial=WH0147641"
```

```
{
  "operation": "status",
  "serial": "WH0147641",
  "status": "Tracking",
  "totalTime": 6,
  "totalCurrent": 1.168755,
  "totalPower": 4.368473,
  "maxCurrent": 308.2275,
  "maxPower": 1098.633,
  "minVoltage": 3.9,
  "currentCurrent": 100.23,
  "currentVoltage": 4.01,
  "currentPower": 1000.79,
  "interval": 500,
}
```

API - All

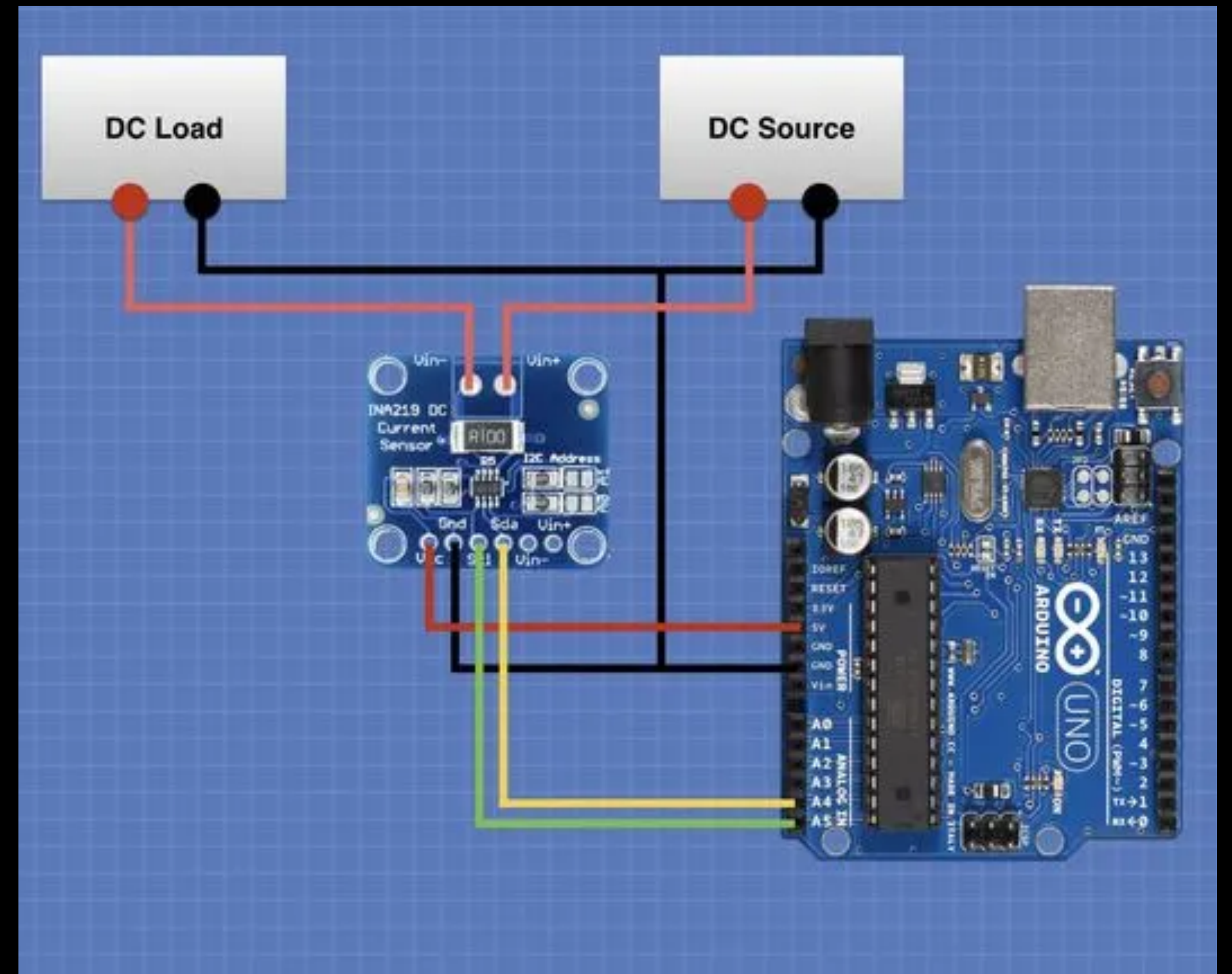
- all - статусы всех датчиков

```
curl -X GET "192.168.241.177/all"
```

```
{
  "sensors": [
    {
      "address": 65,
      "serial": "SW0123456",
      "state": "idle"
    },
    {
      "address": 66,
      "serial": "SN_42",
      "state": "idle"
    },
    {
      "address": 70,
      "serial": "SN_46",
      "state": "idle"
    },
    {
      "address": 72,
      "serial": "SN_48",
      "state": "idle"
    }
  ]
}
```

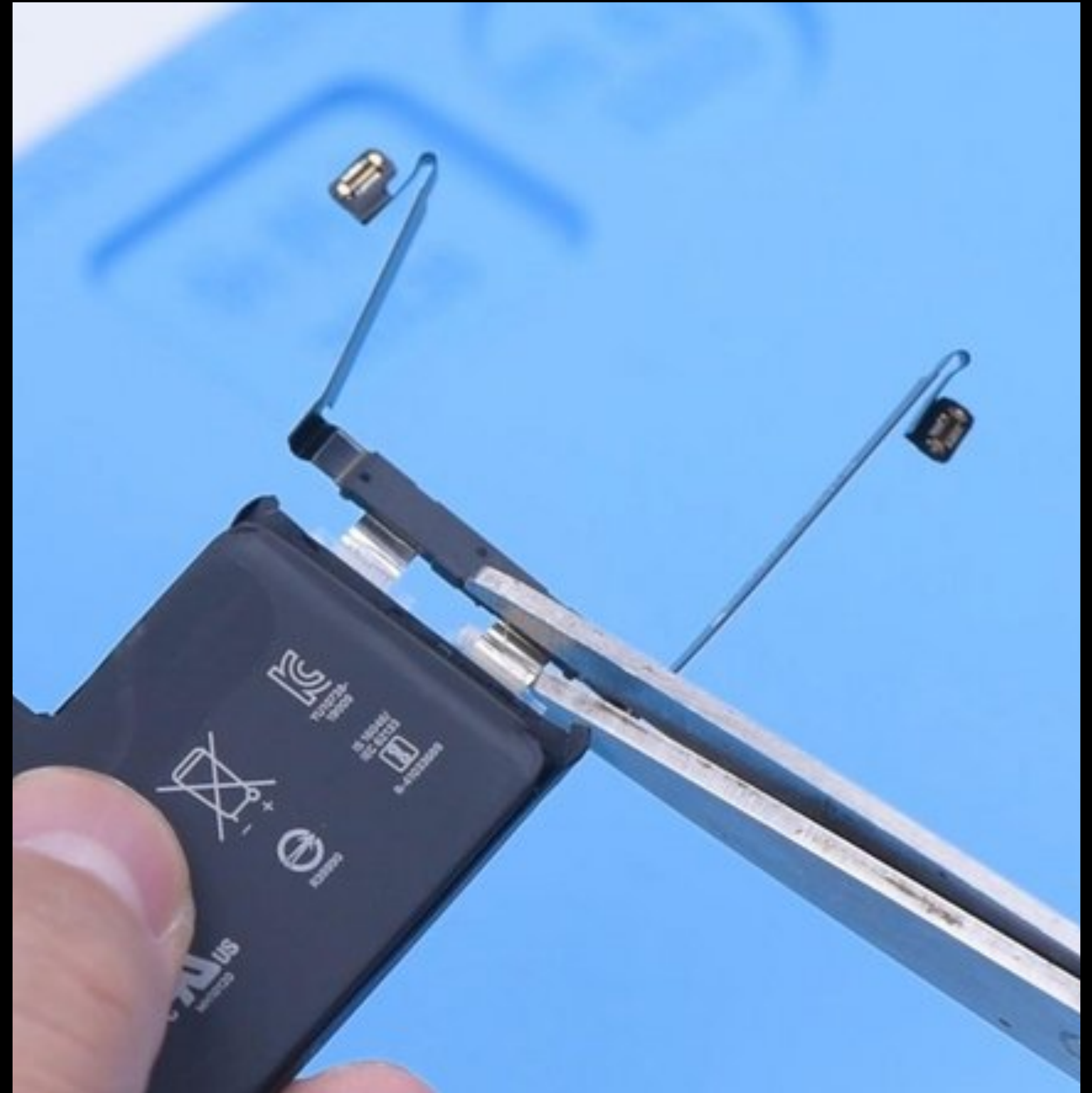
Аппаратная часть

- Подбор шунта
- Пайка шунта
- Пайка к телефону



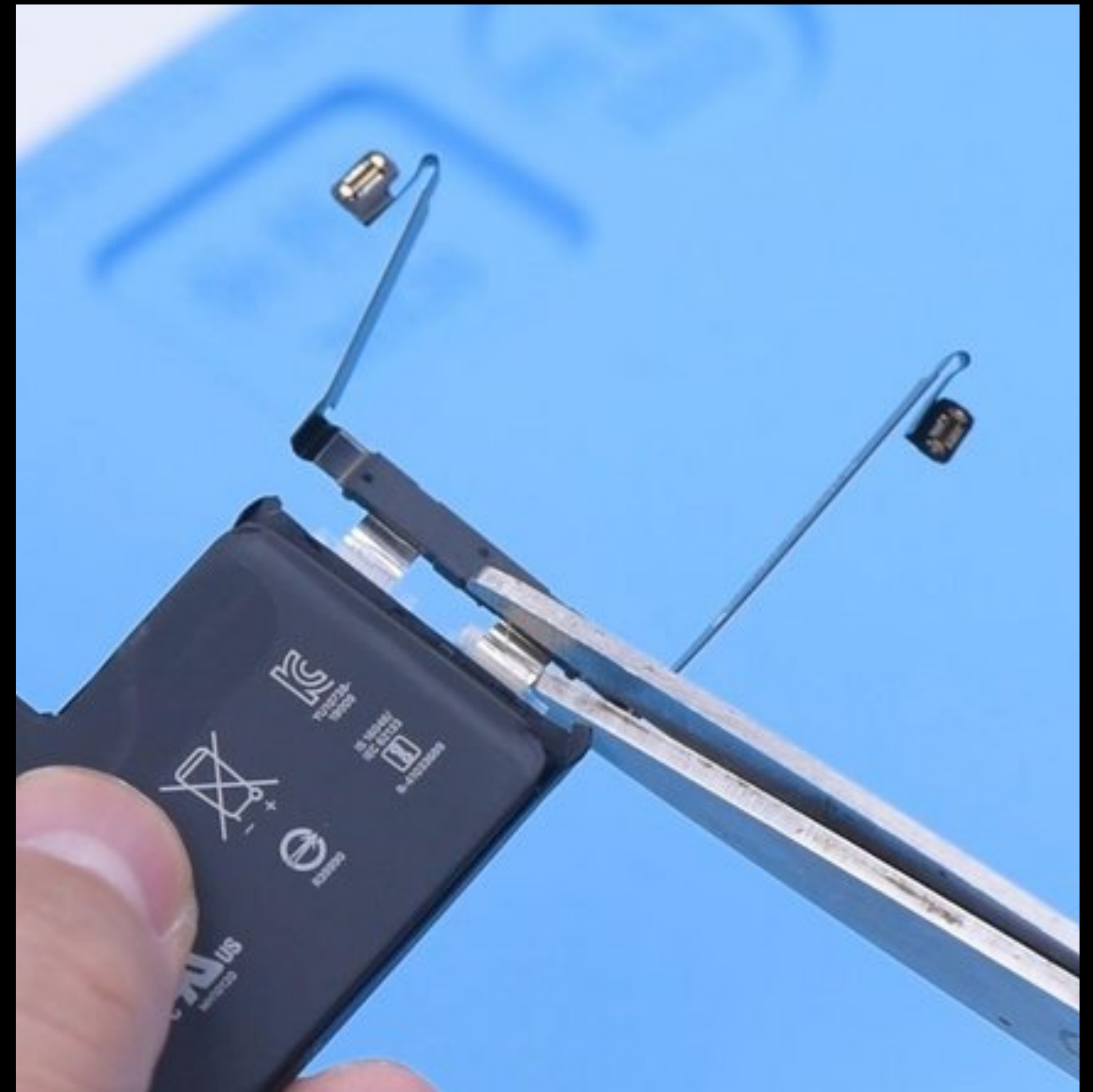
Пайка

- Ортофосфорная кислота
- Нейтрализатор (сода)
- Паять ближе к BMS
- Джедайский алгоритм интеграции



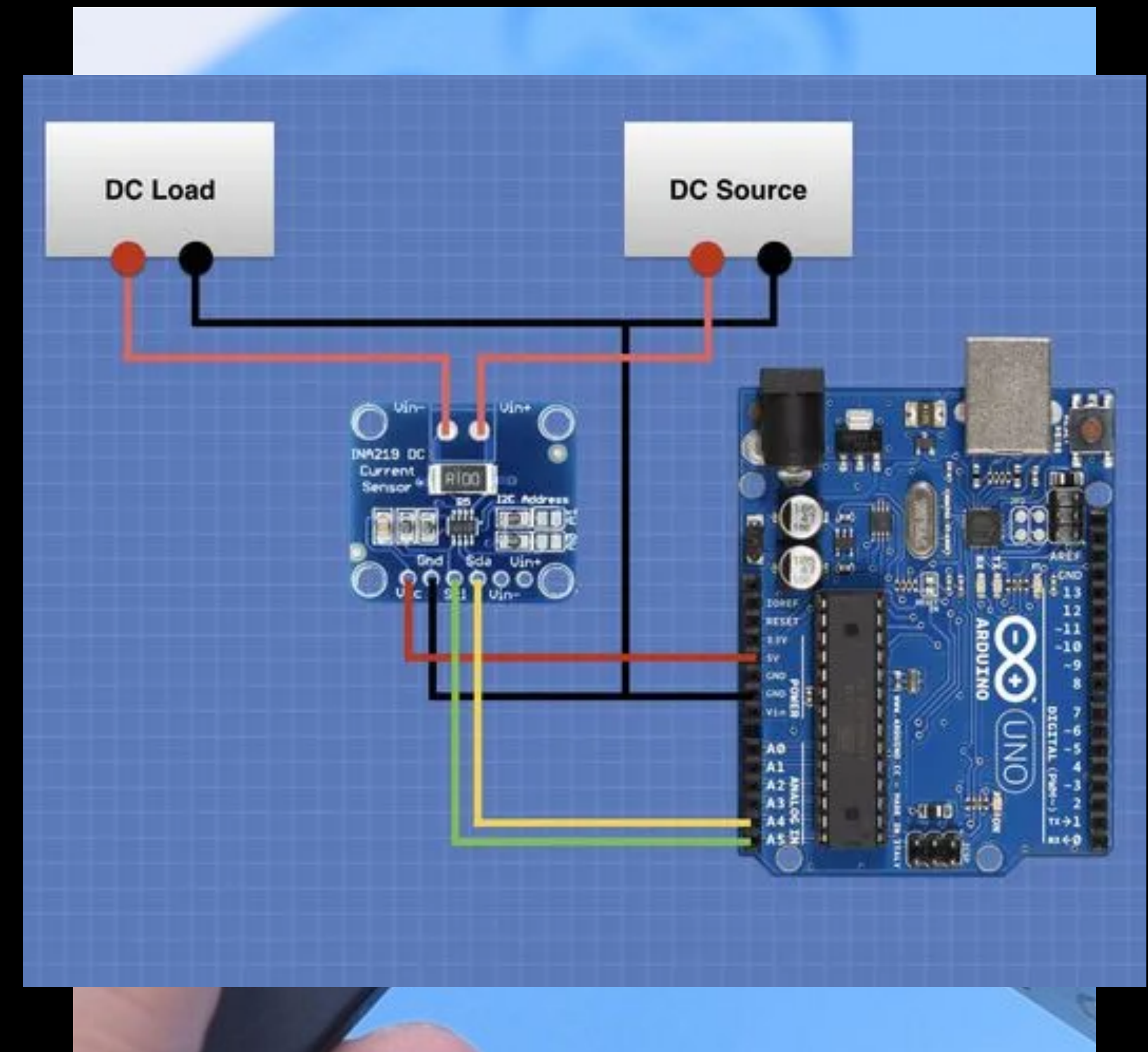
Джедайский алгоритм интеграции

- Пайка минусового провода
- Пайка плюсового провода рядом с BMS
- Пайка второго плюсового провода чуть ниже
- Разрезать/отпаять «+» провод ИП

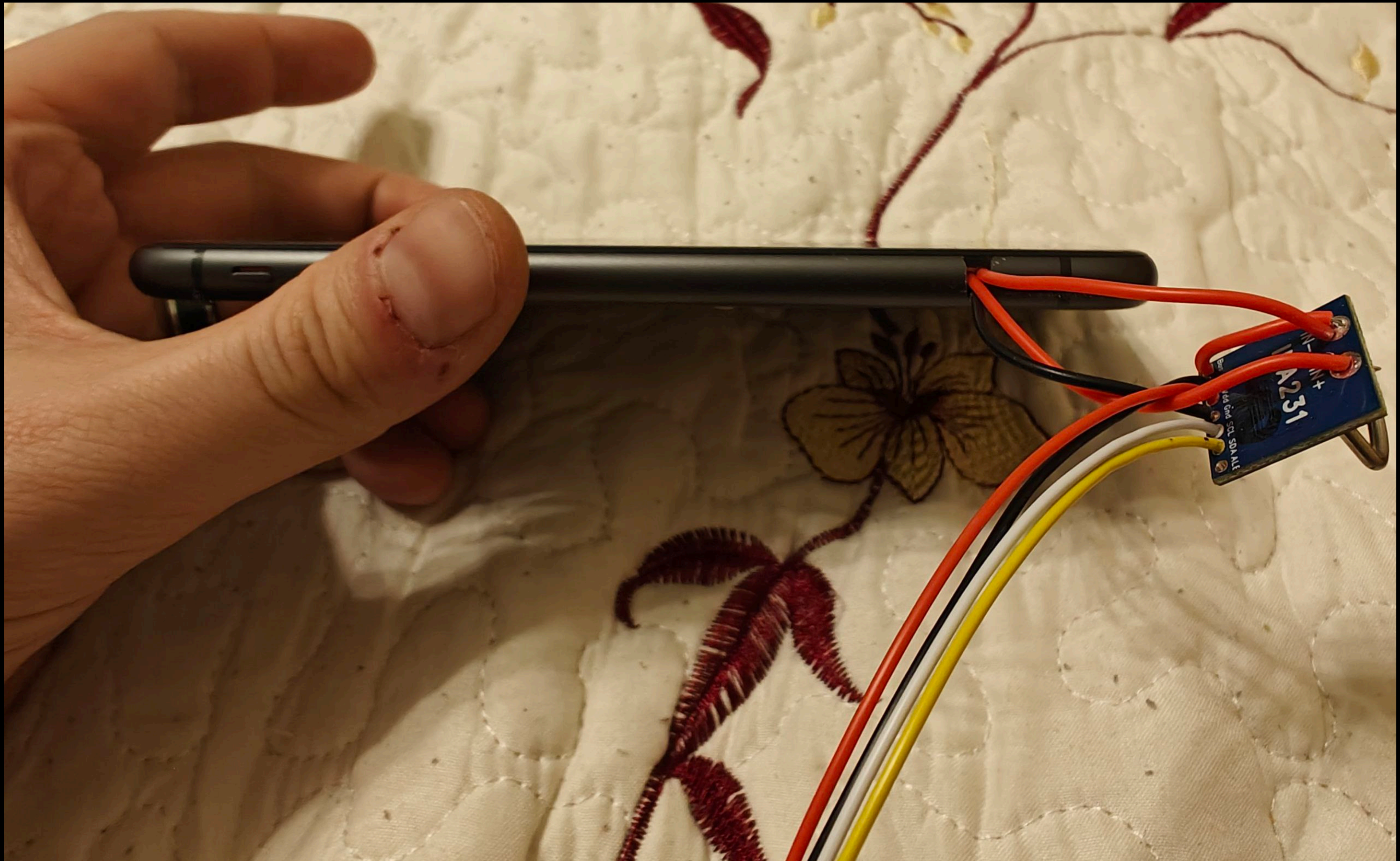


Джедайский алгоритм интеграции

- Пайка минусового провода
- Пайка плюсового провода рядом с BMS
- Пайка второго плюсового провода чуть ниже
- Разрезать/отпаять «+» провод ИП





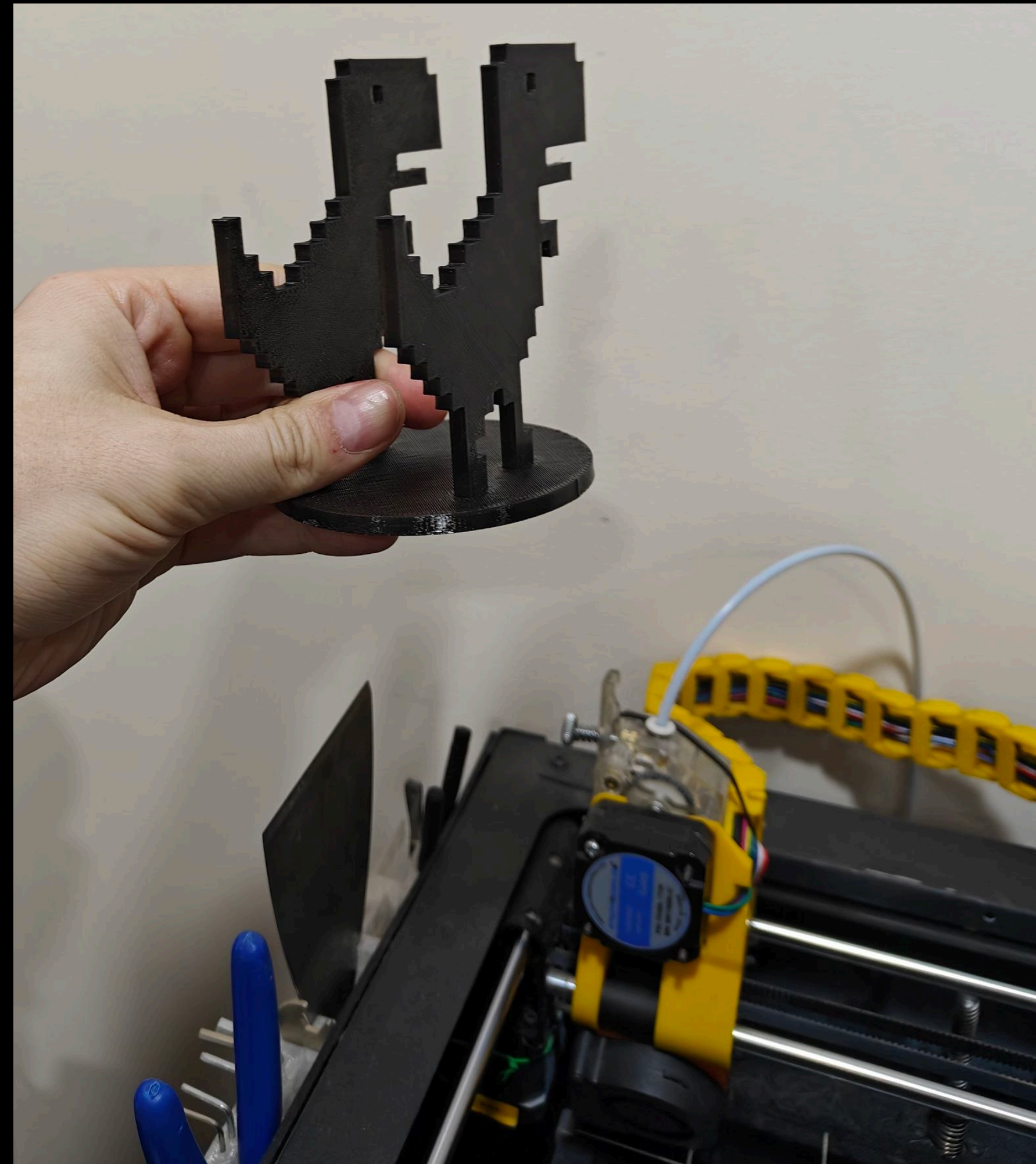


Зд печать

Зд печать

- Корпус МК
- Корпус датчика
- Подставка под телефон

3д печать



Зд печать



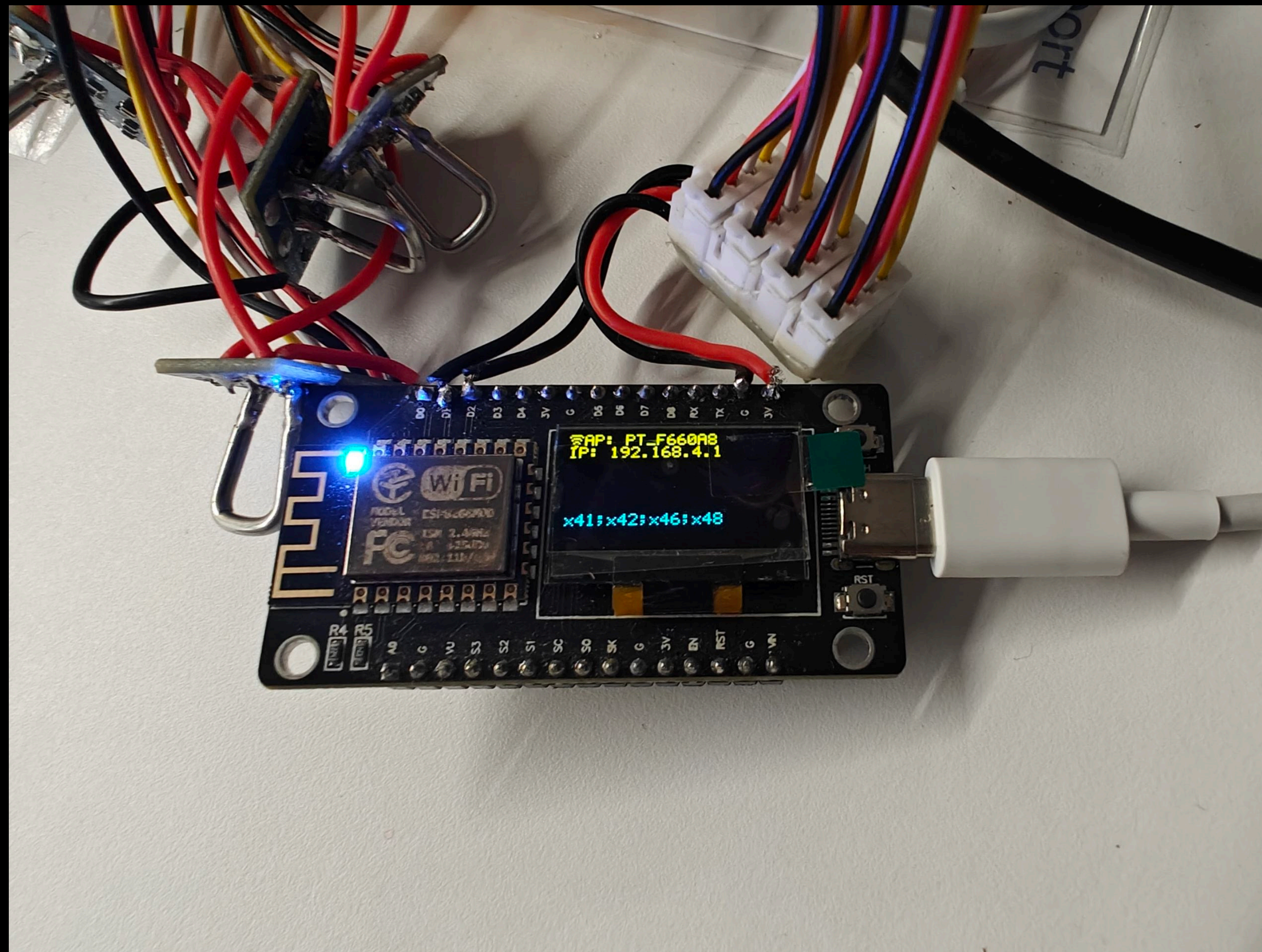
Сценарии использования

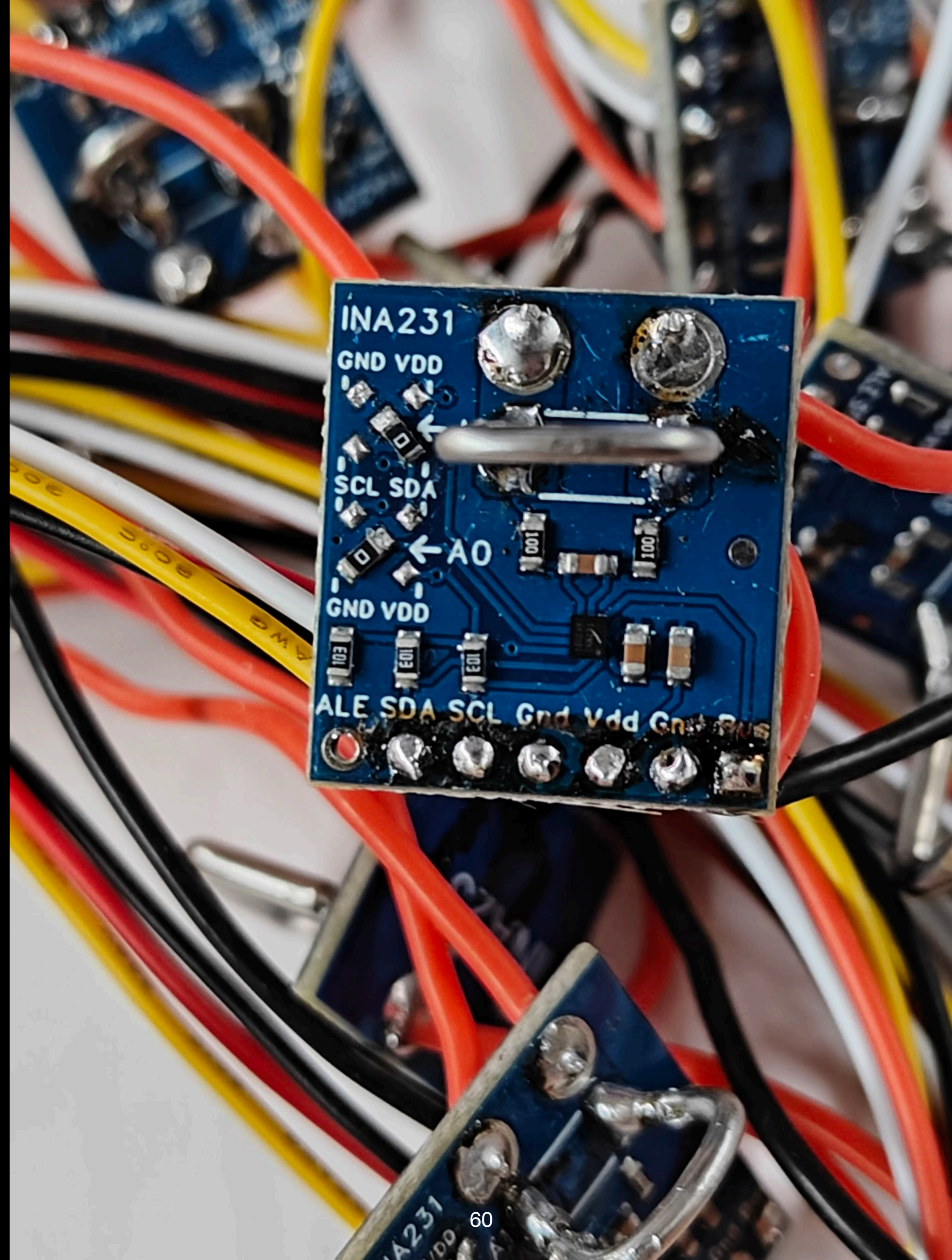
Сценарии использования

- UI-тесты/CI
- Проверка гипотез
- Разработка и отладка: hardware & software

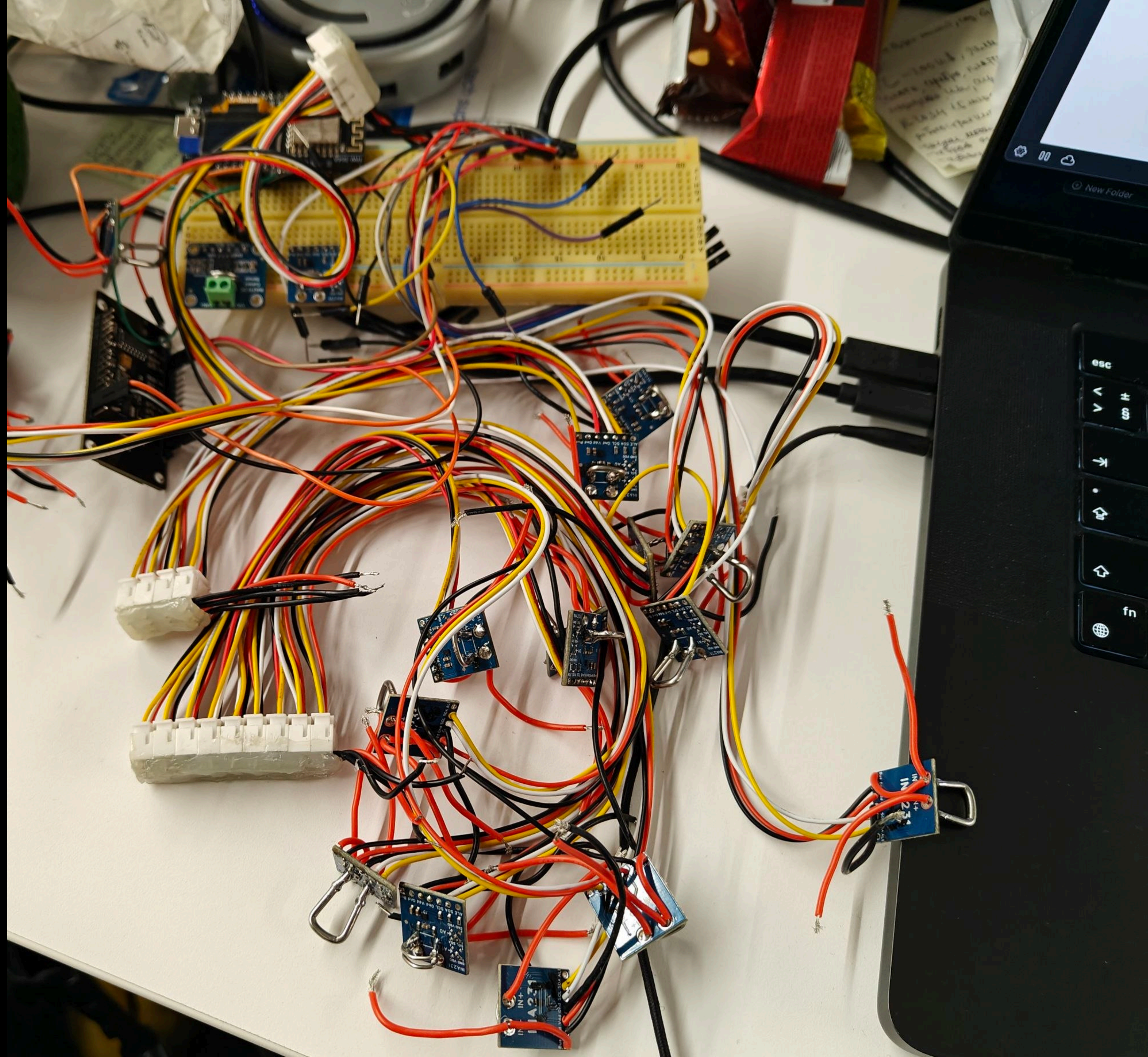
Эксплуатация

Эксплуатация





INA231
GND VDD
SCL SDA
← AO
GND VDD
ALE SDA SCL Gnd Vdd Gnd Bus



- Схема CI и хабов как у нас работает

Что получилось

- Web-интерфейс, API
- 16 датчиков (приборов)
- Низкая цена (4\$ МК, 2\$ датчик INA231)
- Высокая точность измерений
- Самостоятельная ферма

Сложности и ограничения

- Батареи 2р (iPhone)
- Необходимость вмешательства в устройство



Доработки на будущее

Доработки на будущее

- Плагин для IDE (интеграция с LayoutInspector)
- Управление питанием телефонов/планшетов
- Платформа для управления (Конфиги на сервере и самонастройка)
- Шлейфы
- ESP32 C6

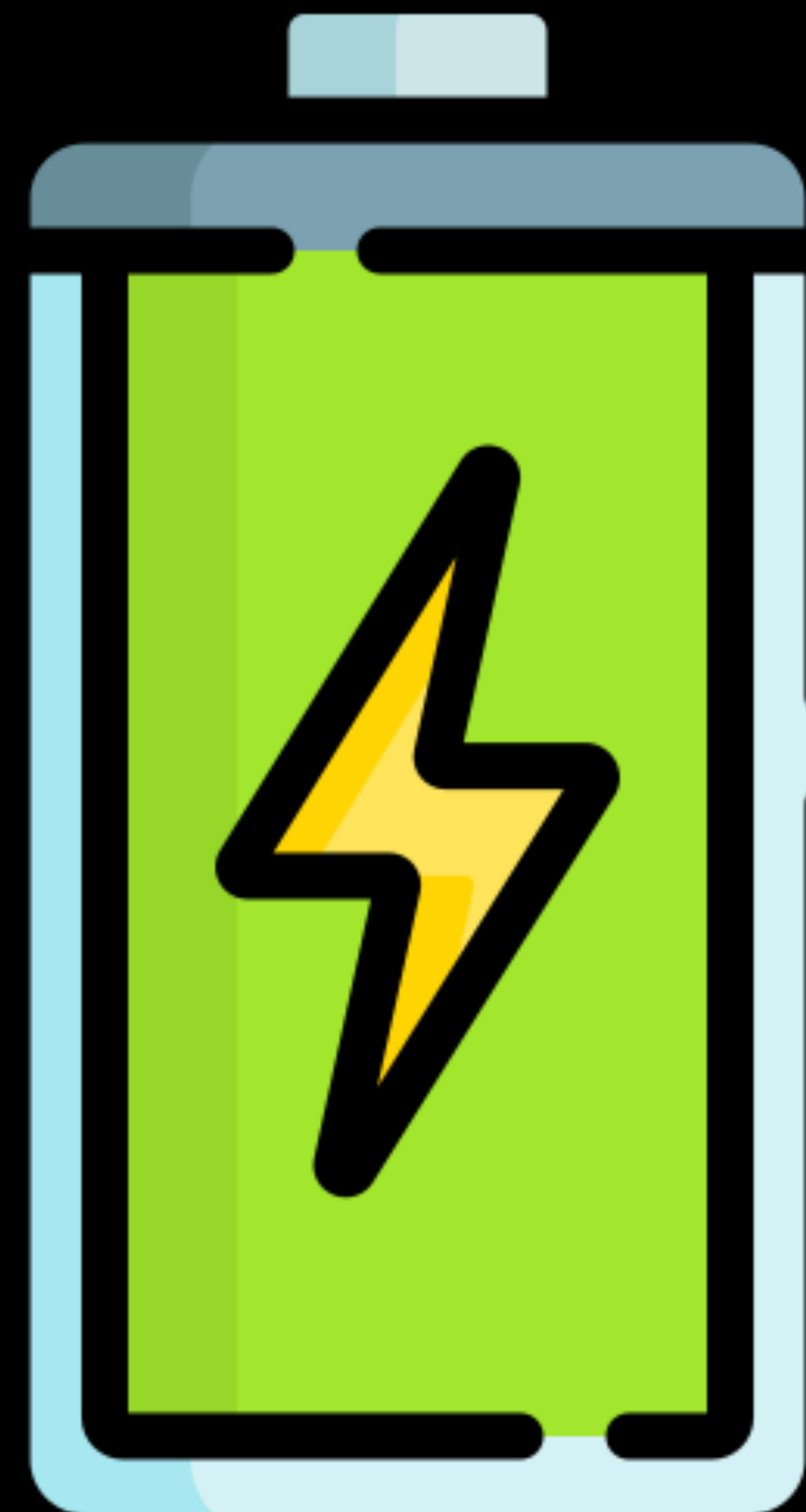
Инструкция по сборке и настройке

Запуск

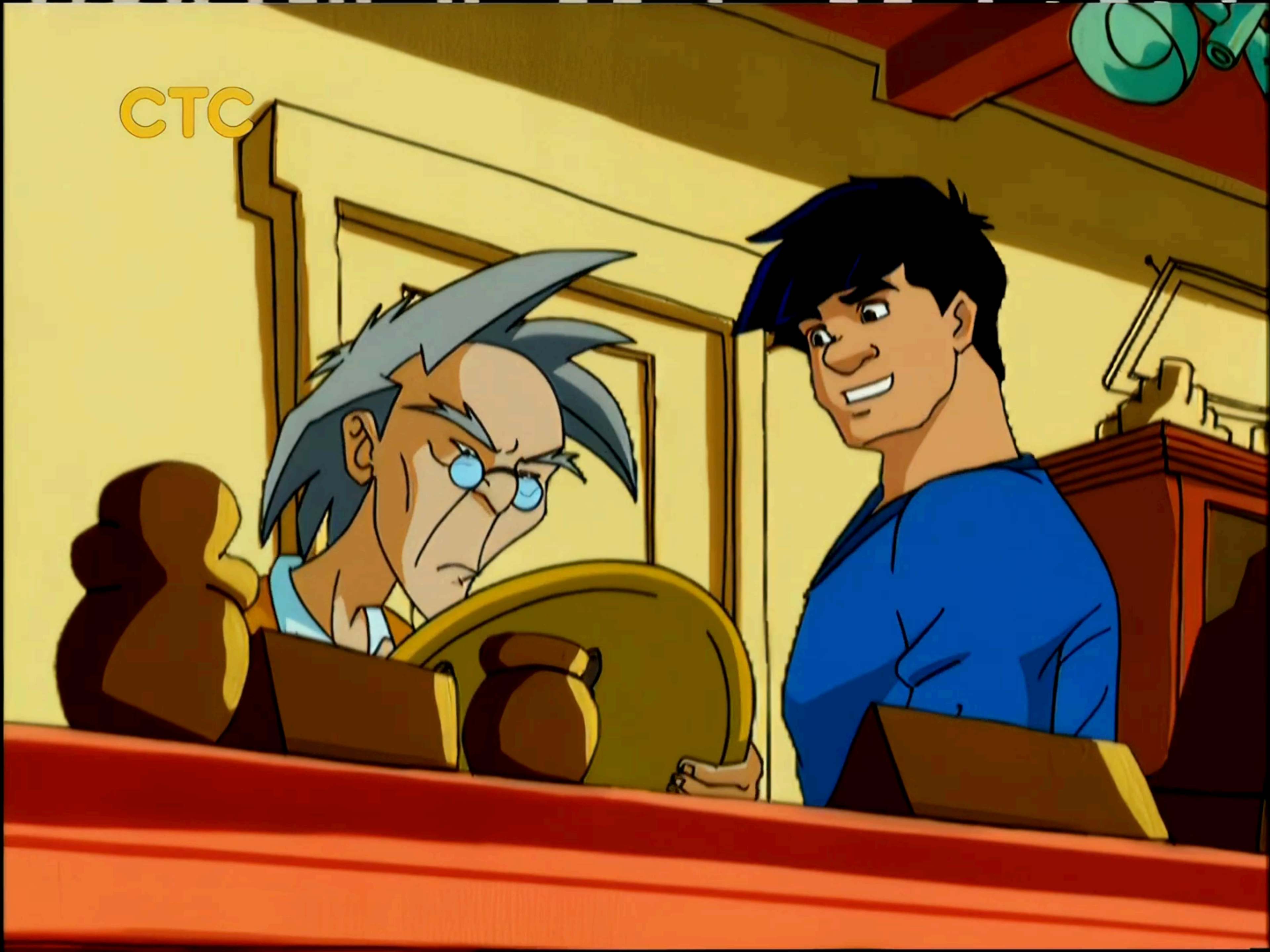
- Поднятие точки доступа
- Ввод кредов для подключения к wi-fi
- Настройка параметров цепи датчиков
- Настройка подключенных приборов

Итоги

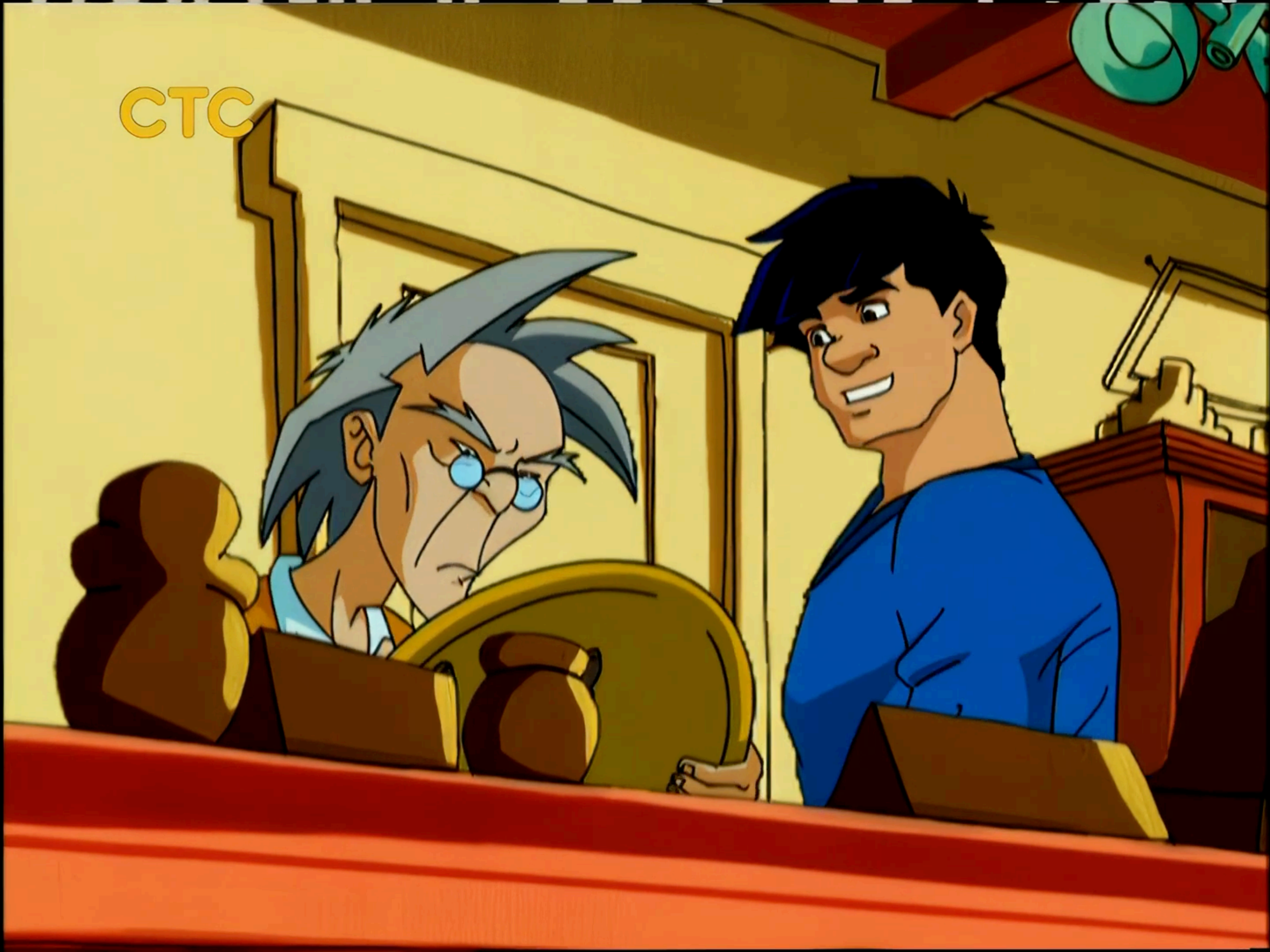
- Методика
- Набор элементов
- Инструкция
- Зд модели корпусов



CTC



CTC



- Ссылка на GitHub

Благодарствую за внимание!