

Литература

1. Шпак, Ю. А. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров / Ю. А. Шпак. – К. : МК-Пресс ; СПб. : КОРОНА-БЕК, 2011.
2. MikroC PRO for PIC. User's manual. – 2014. – URL: <http://www.mikroe.com>.

**РАЗРАБОТКА АВТОНОМНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПРОВОДНОГО
ПРОТОКОЛА ZIGBEE**

А. А. Лупарев

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научные руководители: В. А. Карпов, Ю. В. Крышнев, А. Е. Запольский

Отражены особенности разработки автономных датчиков температуры, влажности и давления с беспроводным протоколом Zigbee для применения в сварочном регистраторе.

Ключевые слова: Zigbee, ESP32-H2, термодатчик, датчик влажности, датчик давления, REF200, ADS1118, термистор, измерение температуры сварки, автономный датчик, калибровка, энергоэффективность, регистрация данных.

Системы регистрации технологических параметров при сварочных работах требуют непрерывного контроля температуры шва, влажности и давления для соблюдения технологии. Применение автономных беспроводных датчиков на Zigbee позволяет отказаться от проводных подключений, снизить влияние человеческого фактора и повысить точность измерений за счет близкого расположения датчиков к точке сварки [1].

Основной целью работы являлась разработка системы из Zigbee-датчиков, способной измерять температуру в диапазоне от минус 40 °С до плюс 500 °С, влажность и атмосферное давление, с последующей передачей данных в реальном времени на координатор сварочного регистратора. Для выполнения задачи использовались микроконтроллерное устройство ESP32-H2 с поддержкой Zigbee, малошумящие аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ADS1118, источники тока REF200 и прецизионные термисторы [2–4].

Для построения экспериментальной установки были разработан макет, включающий термодатчики с выносными термисторами, источник опорного тока и делитель напряжения для измерения напряжения аккумулятора. В качестве источника питания использовались литиевые аккумуляторы. На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема термодатчика.

Процесс измерений показателей включает в себя собственно измерение и передачу данных с применением беспроводного протокола Zigbee на координатор, подключённый к регистратору по интерфейсу UART. Датчики температуры, влажности и давления производят циклическое измерение параметров с интервалом в 3 с, что позволяет отслеживать изменения технологических параметров в процессе сварки и термообработки изделий.

Сигналы с термисторов поступают на АЦП ADS1118, обеспечивая стабильную дискретизацию и достаточную точность для сварочных работ.

Для контроля питания датчиков использовались делители напряжения, значения напряжения с них передавались по протоколу Zigbee, что позволяло своевременно отслеживать заряд аккумуляторов и планировать их замену или подзарядку.

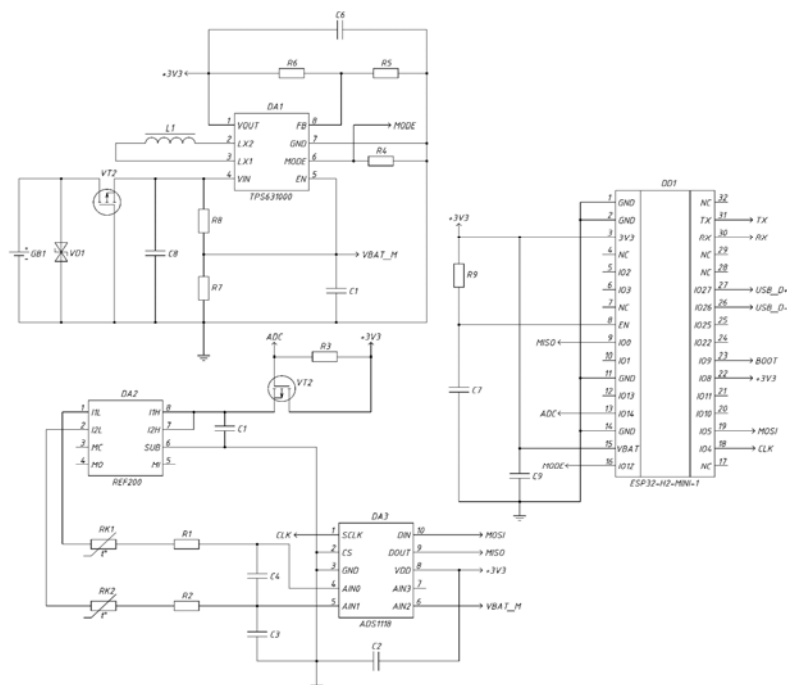


Рис. 1. Принципиальная схема Zigbee-термоматчика

На рис. 2 представлена структурная схема взаимодействия датчиков с координатором и промышленным компьютером.

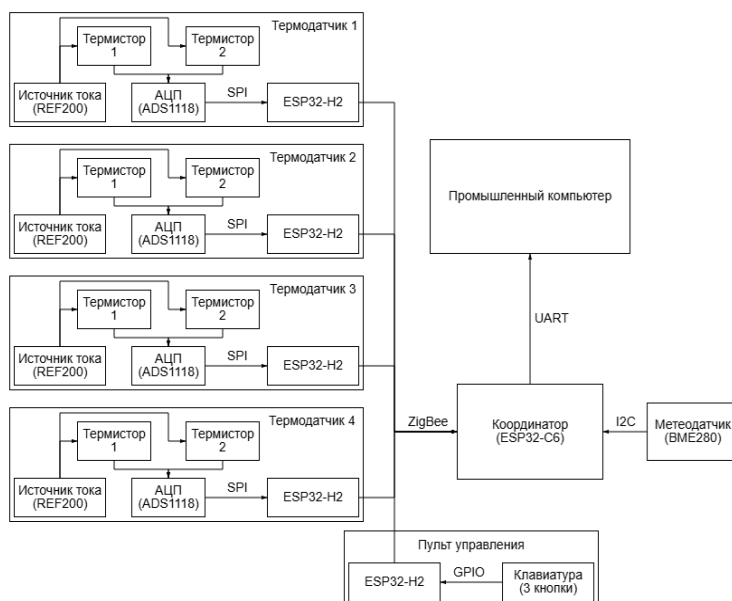


Рис. 2. Структурная схема системы с Zigbee-датчиками

В ходе испытаний датчиков была подтверждена стабильность работы системы при различных температурных условиях, в том числе при температурах свыше 200 °С. Погрешность измерения температуры составила не более 0,5 °С в диапазоне от 0 до 100 °С и около 1 °С в диапазоне до 500 °С, что соответствует требованиям к измерениям при сварке и термообработке.

Для анализа качества связи использовались встроенные функции стека Zigbee, позволяющие оценивать уровень сигнала, стабильность пакетов и отклики от координатора. Формирование пакетов в сети Zigbee происходило с добавлением идентификаторов кластера, ID устройства, ID атрибута и значения измеряемого параметра, что позволило легко различать данные с разных датчиков в системе регистрации [5].

На рис. 3 показан пример отображения данных датчиков в систему регистратора сварки, где видно распределение измерений по времени и устройствам.

```
I (4596) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(20) достигнутый эндпоинт(1)
кластер(0xb04)
I (4606) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(21) достигнутый эндпоинт(2)
кластер(0xb04)
I (4626) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(22) достигнутый эндпоинт(3)
кластер(0x402)
I (4636) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(22) достигнутый эндпоинт(3)
кластер(0xb04)
I (4656) UART: TS:1010;33;72;54;0;4051;1
I (9556) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(20) достигнутый эндпоинт(1)
кластер(0xb04)
I (9566) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(21) достигнутый эндпоинт(2)
кластер(0xb04)
I (9576) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(22) достигнутый эндпоинт(3)
кластер(0x402)
I (9586) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(22) достигнутый эндпоинт(3)
кластер(0xb04)
I (9606) UART: TS:1010;32;76;86;0;4050;1
I (10826) BME280: Температура: 25.88 °C
I (10826) BME280: Влажность: 45.77 %
I (10826) BME280: Атмосферное давление: 995.47 гПа
I (10826) UART: MS:25.9;45.8;995.5
I (14566) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(20) достигнутый эндпоинт(1)
кластер(0xb04)
I (14576) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(21) достигнутый эндпоинт(2)
кластер(0xb04)
I (14586) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(22) достигнутый эндпоинт(3)
кластер(0x402)
I (14606) Zigbee_C: Получен репорт от адреса(0x622) исходный эндпоинт(22) достигнутый эндпоинт(3)
кластер(0xb04)
I (14616) UART: TS:1010;32;91;60;0;4055;1
```

Рис. 3. Пример отображения данных с датчиков в системе регистратора

Расчеты энергопотребления показали, что в спящем режиме потребление датчиков составляло порядка 15–20 мкА, а в активном режиме с передачей данных – до 20–25 мА, что позволяет устройствам работать автономно от аккумулятора емкостью 350 мА · ч в течение от 5 до 7 суток без подзарядки.

В результате работы была подтверждена работоспособность и точность датчиков с применением Zigbee в условиях сварочных работ. Система обеспечивает удобство развёртывания, точность и надежность беспроводных измерений без необходимости постоянного участия оператора, а также легкость интеграции в существующие сварочные регистраторы.

Л и т е р а т у р а

1. Espressif Systems. – URL: <https://espressif.com/> (дата обращения: 22.06.2025).
2. ESP32-H2 Datasheet. – URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (дата обращения: 22.06.2025).
3. ADS1118 Datasheet. – URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/ADS1118/> (дата обращения: 22.06.2025).
4. REF200 Datasheet. – URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/REF200/> (дата обращения: 22.06.2025).
5. ZigBee Cluster Library. – URL: <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/12/07-5123-06-zigbee-cluster-library-specification.pdf> (дата обращения: 22.06.2025).