

© А. Т. Байбеков, Д. В. Золотов, Д. А. Варельджян, Е. Ю. Писаревская, 2026

## РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ПРАКТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКТА "STEMiO" ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАВЫКОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ, ПРОГРАММИРОВАНИЯ И "ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ"

Представлена разработка учебно-практического комплекта STEMiO — модульной аппаратно-программной платформы, объединяющей блоки электротехники, программирования микроконтроллеров и "Интернета вещей" (IoT) в едином приборном решении. Описана структурная схема, схемотехнические решения узлов (блок питания с гальванической развязкой и самовосстанавливающимися предохранителями, измерительный блок на базе цифрового мультиметра с SPI-интерфейсом, микроконтроллерный модуль STM32F103C8T6, модуль беспроводной связи ESP32-WROOM-32D). Приведены принципиальные особенности реализации протокола MQTT v3.1.1 и архитектура облачного сервиса STEMiOCloud на основе Node.js, InfluxDB и Grafana. Экспериментально определены метрологические характеристики измерительного блока: погрешность измерения напряжения — 0.25%, тока — 0.8%, задержка передачи команд через облачный сервис — не более 185 мс. Представлены результаты нагрузочного тестирования системы при одно-временной работе 20 комплектов, подтвердившие устойчивость облачной платформы. Разработка может быть использована как приборная база для учебных и исследовательских задач в области IoT.

**Ключевые слова:** учебно-практический комплект, модульная платформа, микроконтроллер STM32, ESP32, "Интернет вещей", MQTT, облачный сервис, схемотехника, погрешность измерений

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий "Интернета вещей" (IoT) и промышленного "Интернета вещей" (IIoT) требует создания недорогих, функционально законченных аппаратно-программных платформ, позволяющих в лабораторных условиях моделировать полный цикл сбора, передачи и обработки данных. Существующие решения, такие как Arduino и Raspberry Pi, обладают ограниченной приборной базой, не включают средства точных электрических измерений и требуют самостоятельной интеграции разнородных модулей [1, 2]. Лабораторные стенды, выпускаемые промышленностью, как правило, ориентированы на одну дисциплину (электротехнику либо программирование) и не поддерживают сквозные IoT-сценарии [3, 4]. Целью настоящей работы является разработка учебно-практического комплекта STEMiO как единой приборной платформы, объединяющей прецизионный измерительный блок, микроконтроллерный модуль и модуль беспроводной связи с облачным сервисом. Новизна разработки заключается:

1) в сквозной архитектуре, обеспечивающей аппаратную и программную совместимость трех функциональных блоков;

2) в реализации протокола MQTT с двухуровневой системой QoS и передачей команд управления;

3) во встроенной системе сбора цифрового следа на энергонезависимую память.

### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И АППАРАТНАЯ АРХИТЕКТУРА

#### *Общая характеристика*

Комплект выполнен в виде настольного кейса. Структурная схема (рис.) включает три функционально законченных блока: блок электротехники и измерений (БЭИ), блок программирования на базе STM32 (БП) и блок "Интернета вещей" на базе ESP32 (БИВ). Блоки соединены стандартными шлейфами через унифицированный 40-контактный разъем, что допускает независимую замену модулей.

#### *Питание блоков*

Питание осуществляется от импульсного блока 12 В / 5 А с гальванической развязкой (коэффициент трансформации 1:1, электрическая прочность изоляции 1500 В). Понижающие стабилизаторы на базе LM2596 (5 В, нагрузочная способность 3 А) и AMS1117-3.3 (3.3 В, нагрузочная способность 1 А) формируют необходимые напряжения.

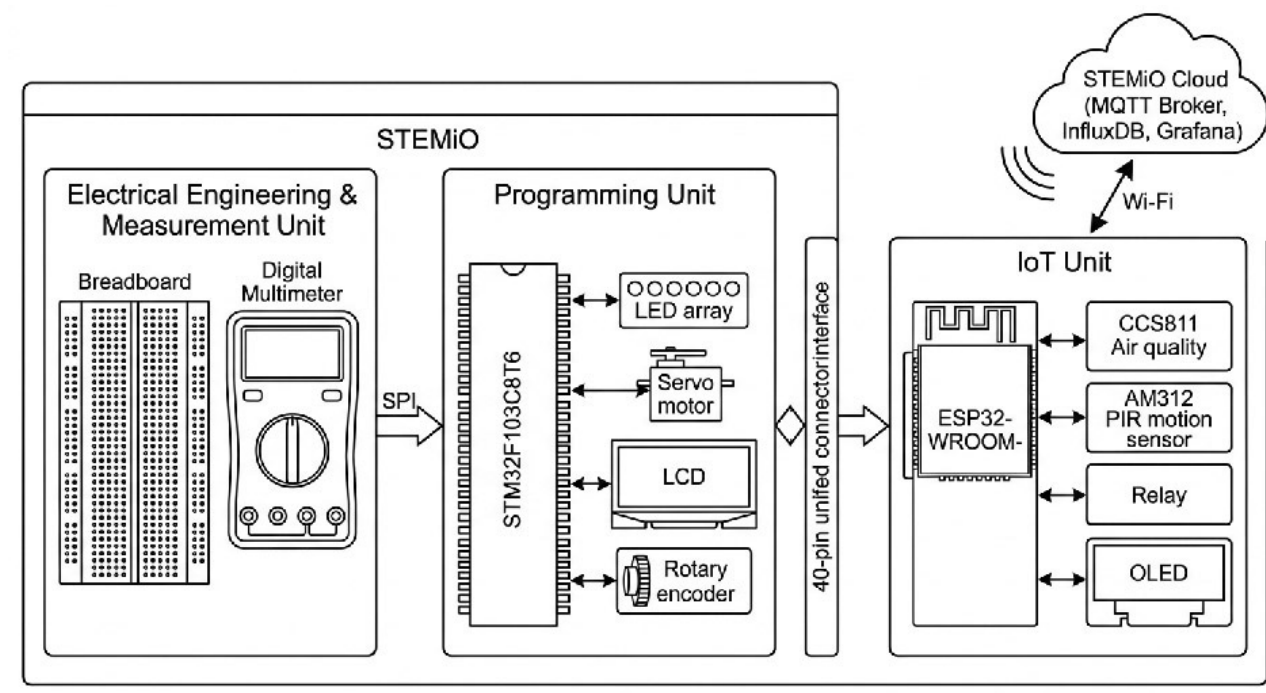


Рис. Структурная схема учебно-практического комплекта STEMiO

Все силовые цепи защищены самовосстанавливающимися предохранителями MF-R050 (0.5 А, время срабатывания 0.15 с).

#### *Блок электротехники и измерений*

БЭИ построен на базе макетной платы с 840 контактами и встроенного цифрового мультиметра на микросхеме NY3131 с 24-битным АЦП, обеспечивающим измерение напряжения постоянного и переменного тока в диапазоне 0–600 В с разрешающей способностью 0.1 мВ и силы тока 0–10 А с разрешающей способностью 0.1 мА. Мультиметр подключен к микроконтроллеру блока БП по интерфейсу SPI (частота синхронизации 4 МГц). Передача результатов измерений в облачный сервис организована через шлюз БИВ. В состав БЭИ входят датчики температуры DS18B20 (точность  $\pm 0.5$  °C в диапазоне  $-10...+85$  °C), освещенности BH1750 (диапазон 1–65535 лк) и тока ACS712 (чувствительность 185 мВ/А). Лабораторный практикум включает 20 схем: от простейших делителей напряжения до активных фильтров второго порядка на операционных усилителях LM358.

#### *Блок программирования*

БП базируется на микроконтроллере STM32F103C8T6 (ядро ARM Cortex-M3, 72 МГц,

64 Кбайт Flash, 20 Кбайт SRAM). Программирование осуществляется в средах Arduino IDE (с пакетом STM32duino) и PlatformIO [5]. Периферия БП включает: линейку из восьми светодиодов с токоограничительными резисторами 220 Ом, сервопривод SG90 с ШИМ-управлением (частота 50 Гц, длительность импульса 0.5–2.5 мс), LCD-дисплей 16×2 символов с интерфейсом I<sup>2</sup>C (адрес 0x27), энкодер с кнопкой, четыре тактовые кнопки. Программы загружаются через встроенный USB-UART преобразователь CH340G. Разработана библиотека абстракции Stemio.h, инкапсулирующая функции ввода–вывода (pinMode, digitalWrite, analogRead и др.) и реализующая запись цифрового следа в энергонезависимую память EEPROM объемом 256 байт.

#### *Блок "Интернета вещей"*

БИВ построен на модуле ESP32-WROOM-32D с Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 ГГц) и Bluetooth 4.2. Подключены датчики качества воздуха CCS811 (определение концентраций (эквивалентной) углекислого газа eCO<sub>2</sub> и летучих органических веществ TVOC по I<sup>2</sup>C), движения AM312 (цифровой выход), реле SRD-05VDC (коммутируемое напряжение 250 В AC / 30 В DC, ток до 10 А) и OLED-дисплей 0.96" на SSD1306 (128×64 пикселей). Обмен данными организован по протоколу MQTT v3.1.1 с уровнями QoS 0 и 1. В качестве

MQTT-брокера использован Mosquitto 2.0.18, развернутый на выделенном сервере (Ubuntu 22.04). Формат телеграмм — JSON, максимальный размер пакета — 256 байт [6].

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ОБЛАЧНАЯ ПЛАТФОРМА

Программирование микроконтроллера STM32 выполняется в Arduino IDE 2.3.2 с установленным пакетом STM32duino (поддержка ядра Maple). Библиотека Stemio.h реализует единый программный интерфейс для C++ и MicroPython. Для ESP32 используется фреймворк Arduino с библиотеками PubSubClient (реализация MQTT-клиента [7], максимальный размер пакета увеличен до 512 байт) и ArduinoJson 7.0 (формирование и парсинг JSON). Скетч, демонстрирующий передачу телеметрии и прием команд, имеет объем 118 строк.

Облачный сервис STEMIOCloud реализован на платформе Node.js 20. Хранение данных — в InfluxDB 2.7, визуализация — Grafana 10.2 [8].

Каждому комплекту присваивается уникальный идентификатор (UUID), что позволяет отслеживать активность отдельных пользователей. API сервиса построено по архитектуре REST, поддерживает запросы GET (чтение телеметрии за период) и POST (отправка команд управления). Задержка передачи команды от веб-интерфейса до исполнительного устройства в пределах локальной сети составляет не более 200 мс.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ХАРАКТЕРИСТИК

Метрологические характеристики измерительного блока БЭИ определялись путем сравнения показаний встроенного мультиметра с эталонным прибором Keysight 34461A (6½ разрядов). Измерения проводились для пяти значений напряжения в диапазоне 0–30 В и тока 0–2 А при температуре  $23 \pm 2$  °С. Результаты (табл.) показывают максимальную относительную погрешность 0.25% для напряжения и 0.8% для тока.

**Таблица.** Результаты измерения метрологических характеристик БЭИ

| Измеряемая величина | Эталонное значение | Показания STEMiO | Абсолютная погрешность | Относительная погрешность, % |
|---------------------|--------------------|------------------|------------------------|------------------------------|
| Напряжение, В       | 5.012              | 5.002            | 0.010                  | 0.20                         |
| —"                  | 10.003             | 10.016           | 0.013                  | 0.13                         |
| —"                  | 15.008             | 15.035           | 0.027                  | 0.18                         |
| —"                  | 20.001             | 19.956           | 0.045                  | 0.22                         |
| —"                  | 30.004             | 29.929           | 0.075                  | 0.25                         |
| Ток, мА             | 100.2              | 99.5             | 0.7                    | 0.70                         |
| —"                  | 500.4              | 504.2            | 3.8                    | 0.76                         |
| —"                  | 1000.1             | 1008.0           | 7.9                    | 0.79                         |
| —"                  | 1500.3             | 1511.9           | 11.6                   | 0.77                         |
| —"                  | 2000.0             | 1984.2           | 15.8                   | 0.79                         |

**Примечание.** Приведены средние значения по трем измерениям.

Нагрузочное тестирование облачной платформы проводилось при одновременной работе 20 комплектов, каждый из которых отправлял телеметрию с интервалом 5 с (суммарно 4 запроса/с). В течение 6 ч непрерывной работы зафиксировано 0 потерянных пакетов, средняя задержка доставки данных в InfluxDB составила 185 мс (максимальная — 310 мс), загрузка CPU сервера не превышала 22%. Архитектура показала устойчивость к пиковым нагрузкам до 12 запросов/с без деградации производительности.

#### СРАВНЕНИЕ С АНАЛОГАМИ

По сравнению с известными разработками [9–12] комплект STEMiO выигрывает за счет:

- 1) встроенного прецизионного измерительного блока с SPI-интерфейсом, позволяющего не только проводить электрические измерения, но и передавать их результаты в облако;
- 2) реализации сквозного протокола MQTT от датчика до облачной визуализации;
- 3) унифицированного 40-контактного разъема, обеспечивающего взаимозаменяемость модулей.

В отличие от платформы NI ELVIS, STEMiO на порядок дешевле при сохранении ключевых измерительных и коммуникационных возможностей.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан учебно-практический комплект STEMiO — модульная аппаратно-программная платформа, объединяющая прецизионный измерительный блок, микроконтроллерный модуль STM32 и модуль беспроводной связи ESP32 с облачным сервисом. Экспериментально определены метрологические характеристики: погрешность измерения напряжения — не более 0.25%, тока — не более 0.8%. Максимальная задержка передачи команд через облачный сервис составила 185 мс. Нагрузочное тестирование подтвердило устойчивость платформы при одновременной работе 20 комплектов. Разработка может быть использована в качестве приборной базы для лабораторных практикумов и исследований в области "Интернета вещей". Перспективы работы связаны с расширением функций облачного сервиса (интеграция аналитики на базе машинного обучения) и разработкой дополнительных измерительных модулей.

*Авторы выражают благодарность администрации Кубанского государственного технологического университета за предоставленную лабораторную базу. Исследование выполнено без внешнего финансирования.*

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крылатов А.Ю., Иванова В.С. Лабораторный стенд по микропроцессорной технике на базе платформы easyelectronics. Томск: ТПУ, 2019. 64 с. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/55102>
2. Рабинович П.Д., Заведенский К.Е., Самойлов Н.Е. Школа проектных технологий: интернет вещей в межпредметном обучении // Информатика и образование. 2020. № 9. С. 34–43. DOI: 10.32517/0234-0453-2020-35-9-6-19
3. Акыев Д., Айметов Ч., Овезгелдиев В., Халбаева Дж. Подготовка инженеров в высших учебных заведениях. STEM-технологии // Инновационная наука. 2025. № 3-2-1. С. 102–103. URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/IN-2025-03-2-1.pdf>
4. Зуев А.С., Шендяпин А.В., Денисов Ю.Е. Основы интернета вещей с применением программно-аппаратного комплекса: практикум. М.: РТУ МИРЭА, 2025. 120 с.
5. Гончаров К.Е., Шестаков Д.А. Микроконтроллерное ядро для упрощенного создания лабораторных стендов на базе ESP32 // Volga Cyber Week: сб. тр. I Всерос. науч.-техн. конф. по информатике и кибернетике (Самара, 24–26 марта 2025 г.). Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2025. С. 19–20. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82732089>
6. Ванин П.А., Нестеров А.С., Холодильни И.Ю. Внедрение технологий IoT и AR на примере учебного лабораторного стенда для практических занятий студентов электротехнических специальностей // Вестник Южно-Уральского ГУ: серия "Энергетика". 2020. Т. 20, № 1. С. 123–133. URL: <https://vestnik.susu.ru/power/article/view/10378>
7. Banks A., Gupta R. MQTT Version 3.1.1. OASIS Standard. 2014. URL: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html> (дата обращения: 10.04.2026).
8. Мастерских М.А., Кноль М.Г., Роевко (Дудник) А.О. Разработка модульной лаборатории SmartLab для обучения студентов технических вузов технологиям IoT // НАНОИНДУСТРИЯ. 2024. Т. 17, № 1. С. 32–42. DOI: 10.22184/1993-8578.2024.17.1.32.42
9. Лелеков А.Т., Курешов В.А. Удаленная лаборатория для проектирования систем ориентации малых космических аппаратов // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 5. С. 154–159. DOI: 10.31857/S0032816222050196
10. Аксенов Е.Н., Деткова А.В. Лабораторный стенд для проверки плат семейства Ардуино // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. 2022. № 3. С. 124–129. URL: <https://elibrary.ru/yimstp?ysclid=mpcqaipjvk991922895>
11. Глушак Е.В., Куприянов А.В. Введение в Интернет вещей: лабораторные работы: практикум. Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2022. 88 с.

12. Григорьев С.В. Разработка аппаратно-программных средств для IoT-обучения. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2023. 22 с.

Контакты: Байбеков Алан Тимурович,  
arслан7753192@gmail.com

Материал поступил в редакцию 14.05.2026

*Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар*

# DEVELOPMENT OF THE "STEMiO" EDUCATIONAL AND PRACTICAL KIT FOR FORMING SKILLS IN ELECTRICAL ENGINEERING, PROGRAMMING, AND "THE INTERNET OF THINGS"

**A. T. Baybekov, D. V. Zolotov, D. A. Varel'dzhyan, E. Yu. Pisarevskaya**

*Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia*

The development of the STEMiO educational and practical kit is presented - a modular hardware-software platform integrating blocks for electrical engineering, microcontroller programming, and the Internet of Things into a single instrumentation solution. The structural diagram and circuit designs of the nodes are described: a power supply unit with galvanic isolation and self-resetting fuses, a measurement unit based on a digital multimeter with an SPI interface, an STM32F103C8T6 microcontroller module, and an ESP32-WROOM-32D wireless communication module. The key implementation features of the MQTT v3.1.1 protocol and the architecture of the STEMiO Cloud service based on Node.js, InfluxDB, and Grafana are presented. The metrological characteristics of the measurement unit were experimentally determined: voltage measurement error — 0.25%, current measurement error — 0.8%, command transmission delay through the cloud service — no more than 185 ms. The results of stress testing of the system with 20 kits operating simultaneously are presented, confirming the stability of the cloud platform. The development can be used as an instrumentation base for educational and research tasks in the IoT field.

**Keywords:** educational and practical kit, modular platform, STM32 microcontroller, ESP32, Internet of Things, MQTT, cloud service, circuit design, measurement error

## REFERENCES

1. Krylatov A.Yu., Ivanova V.S. *Laboratornyj stend po mikroprocessornoj tekhnike na baze platformy easyelectronics* [Laboratory setup for microprocessor technology based on the easyelectronics platform]. Tomsk: TPU, 2019. 64 p.  
URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/55102>
2. Rabinovich P.D., Zavedenskiy K.E., Samoylov N.E. [School of project technologies: The internet of things in the interdisciplinary learning]. *Informatika i obrazovanie* [Informatics and education], 2020, no. 9, pp. 34–43. DOI: 10.32517/0234-0453-2020-35-9-6-19 (In Russ.).
3. Akyev D., Aimetov C., Ovezgeldiev V., Khalbaeva J. [Training Engineers in Higher Education Institutions: STEM Technologies]. *Innovacionnaya nauka* [Innovative Science], 2025, no. 3-2-1, pp. 102–103. (In Russ.). URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/IN-2025-03-2-1.pdf>
4. Zuev A.S., Shendyapin A.V., Denisov Yu.E. *Osnovy interneta veshchej s primeneniem programmno-apparatnogo kompleksa: praktikum* [Fundamentals of the Internet of Things Using a Hardware-Software System: A Workshop]. Moscow: RTU MIREA, 2025. 120 p. (In Russ.).
5. Goncharov K.E., Shestakov D.A. [A microcontroller core for simplified development of ESP32-based laboratory test benches]. *Sbornik trudov I Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii po informatike i kibernetike: "Volga Cyber Week"* (Samara, 24–26 marta 2025 g.) [Proc. I All-Russ. Sci. tech. Conf. in computer science and cybernetics "Volga Cyber Week" (Samara, 2025 Mar 24–26)], Samara: Samara University Publ., 2025, pp. 19–20. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82732089> (In Russ.).

6. Vanin P.A., Nesterov A.S., Kholodilin I.Yu. [Integration of IIOT and AR technologies into training & teaching via laboratory equipment]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo GU: seriya "Energetika"* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2020, vol. 20, no. 1, pp. 123–133. (In Russ.). URL: <https://vestnik.susu.ru/power/article/view/10378>
7. Banks A., Gupta R. *MQTT Version 3.1.1. OASIS Standard*. 2014. URL: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html> (accessed: 10.04.2026).
8. Masterskikh M.A., Knol M.G., Roenko (Dudnik) A.O. [Development of a modular SmartLab laboratory for teaching students of technical universities of IoT technologies]. *NANOINDUSTRIYA* [Nanoindustry], 2024, vol. 17, no. 1, pp. 32–42. (In Russ.). DOI: 10.22184/1993-8578.2024.17.1.32.42
9. Lelekov A.T., Kureshov V.A. [Remote laboratory for the design of attitude control systems for small satellites]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2022, no. 5, pp. 154–159. DOI: 10.31857/S0032816222050196 (In Russ.).
10. Akseonov E.N., Detcova A.V. [Laboratory stand for checking Arduino family boards]. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Journal of the Transnistrian University. Series: Physical, Mathematical, and Technical Sciences], 2022, no. 3, pp. 124–129. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/yimstp?ysclid=mpcqaipjvk991922895>
11. Glushak E.V., Kupriyanov A.V. *Vvedenie v Internet veshchej: laboratornye raboty: praktikum* [Introduction to the Internet of Things: Lab Exercises: Workshop]. Samara: Samara University Publ., 2022. 88 p. (In Russ.).
12. Grigor'ev S.V. *Razrabotka apparatno-programmnyh sredstv dlya IoT-obucheniya*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Development of hardware and software solutions for IoT training. Autoref. cand. techn. sci. diss.]. Krasnodar, 2023. 22 p. (In Russ.).

Contacts: Baybekov Alan Timurovich,  
arslan7753192@gmail.com

The article was received by the editorial office on 14.05.2026

## INTRODUCTION

The development of Internet of Things (IoT) and Industrial Internet of Things (IIoT) technologies requires the creation of low-cost, fully functional hardware and software platforms that enable the simulation of the full cycle of data collection, transmission, and processing in laboratory conditions. Existing solutions, such as Arduino and Raspberry Pi, have limited instrumentation, do not include precision electrical measurement tools, and require the independent integration of disparate modules [1, 2]. Industrial laboratory setups are typically focused on a single discipline (electrical engineering or programming) and do not support end-to-end IoT scenarios [3, 4]. The goal of this work is to develop the STEMiO educational and practical kit as a single instrument platform combining a precision measurement unit, a microcontroller module, and a wireless communication module with a cloud service. The development's novelty lies in:

- 1) an end-to-end architecture that ensures hardware and software compatibility across three functional blocks;
- 2) implementation of the MQTT protocol with a two-tier QoS system and control command transmission;
- 3) an integrated system of digital trace collection to non-volatile memory.

## STRUCTURAL DIAGRAM AND HARDWARE ARCHITECTURE

### *General characteristics*

The kit is designed as a desktop case. The structural diagram (Fig.) includes three functionally complete blocks: an electrical engineering and measurement block (EEMB), an STM32-based programming block (PB), and an Internet of Things block (IoT) based on the ESP32. The blocks are connected by standard ribbon cables through a unified 40-pin connector, allowing for independent module replacement.

**Fig.** Structural diagram of the STEMiO training and practical kit

### *Power supply of the blocks*

Power is supplied by a 12 V / 5 A pulsed power supply with galvanic isolation (1:1 transformation ratio, 1500 V insulation strength). Step-down regulators based on the LM2596 (5 V, 3 A load capacity) and AMS1117-3.3 (3.3 V, 1 A load capacity) generate the required voltages.

All power circuits are protected by MF-R050 self-resetting fuses (0.5 A, 0.15 s response time).

### *Electrical engineering and measurement block*

The EEMB is based on an 840-pin breadboard and a built-in digital multimeter with an HY3131 chip and a 24-bit ADC, the multimeter is capable of measuring AC and DC voltage in the range of 0–600 V with a resolution of 0.1 mV and current of 0–10 A with a resolution of 0.1 mA. The multimeter is connected to the PB's microcontroller via an SPI interface (synchronization frequency of 4 MHz). Measurement results are transmitted to the cloud service via the IoTB gateway. The EEMB includes DS18B20 temperature sensors (accuracy  $\pm 0.5$  °C in the range of  $-10$  to  $+85$  °C), BH1750 illuminance sensors (range 1–65535 lux), and ACS712 current sensors (sensitivity 185 mV/A). The lab workshop includes 20 circuits, ranging from simple voltage dividers to second-order active filters on LM358 operational amplifiers.

### *Programming block*

The programming unit is based on an STM32F103C8T6 microcontroller (ARM Cortex-M3 core, 72 MHz, 64 KB Flash, 20 KB SRAM). Programming is performed using the Arduino IDE (with the STM32duino package) and PlatformIO [5]. The peripherals of the programming unit include: an eight-LED array with 220  $\Omega$  current-limiting resistors, an SG90 servo drive with PWM control (50 Hz frequency, 0.5–2.5 ms pulse width), a 16×2 character LCD display with an I<sup>2</sup>C interface (address 0x27), an encoder with a pushbutton, and four tact switches. Programs are loaded via the integrated CH340G USB-UART converter. A Stemio.h abstraction library was developed, encapsulating input/output functions (pinMode, digitalWrite, analogRead, etc.) and implementing digital trace writing to 256-byte non-volatile EEPROM memory.

### *Internet of Things (IoT) block*

The IoT Block is built on an ESP32-WROOM-32D module with Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 GHz) and Bluetooth 4.2. Connected sensors include a CCS811 air quality sensor (equivalent carbon dioxide (eCO<sub>2</sub>) and TVOC (volatile organic compound) concentrations measured via I<sup>2</sup>C), an AM312 motion sensor (digital output), an SRD-05VDC relay (250 V AC / 30 V DC switching voltage, up to 10 A), and a 0.96" OLED display with an SSD1306 (128×64 pixels).

Data exchange is organized using the MQTT v3.1.1 protocol with QoS levels 0 and 1. Mosquitto 2.0.18, deployed on a dedicated server (Ubuntu 22.04), is used as the MQTT broker. Telegrams are

formatted in JSON, with a maximum packet size of 256 bytes [6].

## SOFTWARE AND CLOUD PLATFORM

Programming of the STM32 microcontroller is performed in Arduino IDE 2.3.2 with the STM32duino package installed (Maple kernel support). The Stemio.h library implements a unified API for C++ and MicroPython. The ESP32 uses the Arduino framework with the PubSubClient library (an MQTT client implementation [7], with the maximum packet size increased to 512 bytes) and ArduinoJson 7.0 (for generating and parsing JSON). The sketch demonstrating telemetry transmission and command reception is 118 lines long.

The STEMiOCloud cloud service is implemented on the Node.js 20 platform. Data is stored in InfluxDB 2.7, and visualization is provided by Grafana 10.2 [8]. Each kit is assigned a unique identifier (UUID), allowing for tracking the activity of individual users. The service API is built using a REST architecture and supports GET requests (reading telemetry over a period) and POST requests (sending control commands). The command transmission latency from the web interface to the actuator within a local network is no more than 200 ms.

## EXPERIMENTAL VERIFICATION OF CHARACTERISTICS

The metrological characteristics of the EEMB measuring unit were determined by comparing the readings of the built-in multimeter with a Keysight 34461A reference instrument (6½ digits). Measurements were performed for five voltage values in the range of 0–30 V and a current of 0–2 A at a temperature of  $23 \pm 2$  °C. The results (table) show a maximum relative error of 0.25% for voltage and 0.8% for current.

**Tab.** Results of measuring the EEMB metrological characteristics

Load testing of the cloud platform was conducted with 20 kits running simultaneously, each sending telemetry data at 5-second intervals (a total of 4 requests/sec). Over 6 hours of continuous operation, 0 packets were lost, the average data delivery latency to InfluxDB was 185 ms (maximum 310 ms), and CPU server utilization did not exceed 22%. The architecture demonstrated resilience to peak loads of up to 12 requests/sec without performance degradation.

## COMPARISON WITH ANALOGS

Compared to known developments [9–12], the STEMiO kit has a number of advantages:

- 1) a built-in precision measuring unit with an SPI interface, allowing not only electrical measurements but also transmission of their results to the cloud;
- 2) implementation of an end-to-end MQTT protocol from the sensor to cloud visualization;
- 3) a unified 40-pin connector, ensuring interchangeability of modules.

Unlike the NI ELVIS platform, the STEMiO is an order of magnitude cheaper while maintaining key measurement and communication capabilities.

## CONCLUSION

The developed STEMiO training and practical kit is a modular hardware and software platform combining a precision measurement unit, an STM32 microcontroller module, and an ESP32 wireless communication module with a cloud service. Metrological characteristics have been experimentally determined: voltage measurement error is no more than 0.25%, and current measurement error is no more than 0.8%. The maximum command transmission delay via the cloud service was 185 ms. Load testing confirmed the platform's stability during 20 kits operating simultaneously. The development can be used as a base for laboratory workshops and research in the field of the Internet of Things. Future prospects for this work include expanding the cloud service's functionality (integrating machine learning-based analytics) and developing additional measurement modules.

*The authors would like to thank the administration of the Kuban State Technological University for providing laboratory facilities. This research was conducted without external funding.*