

А. А. КЛЄПЦОВ

магістр інженерії програмного забезпечення
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
ORCID: 0009-0008-3147-0618

В. А. ГУСЄВА-БОЖАТКІНА

старший викладач кафедри програмного забезпечення
автоматизованих систем
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0002-1117-3391

РОЗРОБКА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ З ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ ДАТЧИКУ ГАЗУ MQ-2

У даній роботі розглянута можливість калібрування газового датчика моделі MQ-2, на основі відношення опору датчика в чистому повітрі, до опору датчика в присутності газу, з використанням апроксимації залежності цих двох значень від концентрації газу у PPM, а також використання штучного інтелекту для проведення розрахунків. Стаття зосереджена на аналізі проблеми калібрування, огляду вже існуючих програмних, або апаратно-програмних рішень, опису проблем, а також, впровадженні інноваційних методів у вигляді штучного інтелекту, для вирішення задачі калібрування. В статті також буде описана розробка апаратно-програмного комплексу на базі Wi-Fi модулю NodeMCU V3 ESP8266, який дозволить зчитувати показники з датчика MQ-2, підключатись до глобальної мережі інтернет і передавати значення показників до штучного інтелекту, який знаходиться в мережі. Враховуючи використання модуля NodeMCU, обрана мова програмування для програмного забезпечення – це C++ і відповідна середовище розробки – Arduino IDE. Окрім цього, у статті будуть описані методи оптимізації передачі даних, до штучного інтелекту, щоб покращити сам процес калібрування. Буде проведений аналіз показників з розробленого апаратно-програмного комплексу і порівняння їх з еталонними значеннями. Еталонні значення будуть братись з професійного приладу для вимірювання концентрації газу – HAVOTEST HT601B+, який має сертифікати якості, відповідно, його показники можна вважати достовірними. Усі зняття показників з розробленого апаратно-програмного комплексу та еталонного приладу, будуть проводитись в ізольованому, герметичному середовищі, щоб уникнути отримання помилкових значень. По результатам дослідження, будуть зроблені висновки, і виявлено, чи дійсно можна вважати наведені методи ефективними, і чи можливо їх масштабувати для більш глобальних задач.

Ключові слова: калібрування газового датчика, MQ-2, штучний інтелект, апроксимація залежності, концентрація газу у PPM, апаратно-програмний комплекс.

A. A. KLIPTSOV

Master of Software Engineering
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
ORCID: 0009-0008-3147-0618

V. A. GUSEVA-BOZHATKINA

Senior Lecturer at the Department of Automated Systems Software
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
ORCID: 0000-0002-1117-3391

DEVELOPMENT OF A HARDWARE-SOFTWARE SYSTEM USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR CALIBRATION OF THE MQ-2 GAS SENSOR

This study examines the possibility of calibrating the MQ-2 gas sensor based on the ratio of the sensor's resistance in clean air to its resistance in the presence of gas, using the approximation of the dependence of these two values on gas concentration in PPM. Additionally, it explores the use of artificial intelligence for calculations. The article focuses on analyzing the calibration problem, reviewing existing software or hardware-software solutions, identifying challenges, and introducing innovative methods in the form of artificial intelligence to address the calibration issue. The study also describes the development of a hardware-software system based on the NodeMCU V3 ESP8266 Wi-Fi module, which enables reading data from the MQ-2 sensor, connecting to the global internet, and transmitting the sensor readings to artificial intelligence hosted on the network. Given the use of the NodeMCU module, the programming language chosen

for the software is C++, with Arduino IDE as the development environment. Furthermore, the article details methods for optimizing data transmission to artificial intelligence to speed up the calibration process. An analysis of the data obtained from the developed hardware-software system will be conducted and compared to a reference value. The reference values will be obtained using the professional gas concentration measuring device HAVOTEST HT601B+, which is certified for quality and, therefore, provides reliable measurements. All measurements from the developed hardware-software system and the reference device will be carried out in an isolated hermetic environment to avoid erroneous readings. Based on the research results, conclusions will be drawn to determine whether the proposed methods are indeed effective and whether they can be scaled for larger, more complex tasks.

Key words: gas sensor calibration, MQ-2, artificial intelligence, approximation of dependency, gas concentration in PPM, hardware-software complex

Постановка проблеми

Калібрування вимірювальних приладів означає виявлення їхніх справжніх метрологічних властивостей. Він пов'язує показання приладу зі значенням параметра. Без правильного калібрування, можливі неточності середніх цифр, що в результаті, може привести до неправильних результатів досліджень, або навіть до катастроф, якщо датчики використовуються у серйозних комерційних проблемах. В історії людства було багато катастроф через неправильне калібрування. Катастрофи з жертвами траплялись, як на маленьких підприємствах, так і на великих. До прикладу, у 1989 році у Пасадені, відбувся великий вибух спричинений неконтрольованим викидом газу, через те, що датчики тиску були неправильно відкалібровані і оператори банально не встигли відреагувати на проблему. Наслідки аварії – 23 загиблі людини, сотні поранених та сотні мільйонів збитків.

Такі трагедії не обійшли і авіа сегмент. Аварії літаків Boeing 737 MAX у 2018–2019 також вважаються одними з яскравих прикладів проблеми неправильного калібрування, що призвело до великих жертв. Два літаки розбилися через помилкову активацію системи MCAS (Maneuvering Characteristics Augmentation System), яка спрямувала носи літаків вниз. Це сталося тому, що один із датчиків кута атаки був неправильно відкалібрований, через що MCAS отримував хибні дані про небезпечно високий кут атаки. В результаті, літаки нахилились вниз, навіть тоді, коли не було потрібно. Наслідки цього – загибель 346 людей у двох аваріях. Враховуючи вищесказане, до процесу калібрування треба відноситись серйозно, проводити безліч досліджень і тестувань перед випуском якогось продукту в глобальний ринок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Досліджуючи методи калібрування газових датчиків, а конкретно, датчика MQ-2, не було знайдено вже готових ефективних способів. Цей датчик належить до сімейства газових сенсорів з напівпровідниковим металевим оксидом. Таке сімейство можна зустріти у літературі під назвою MOX сенсори (Metal Oxide Semiconductor) [1]. Більшість людей, збираючи свої апаратно-програмні рішення, не дуже піклуються про свою безпеку і тому не калібрують подібні датчики. Через відсутність знань або брак досвіду вони, щоб визначити, коли показання датчика вважаються небезпечними, банально проводять заміри показників напруги з аналогового виходу датчика. Тобто, якийсь час проводяться заміри у чистому повітрі, потім до датчика підноситься джерело газу, записуються, як змінились показники. На основі цих даних і визначаються безпечні і небезпечні показання. Очевидно, такий підхід є в корені неправильним. По-перше, обробка даних проводиться на основі магічних чисел (напруги), що вже є недопустимо. Не враховуються технічні характеристики і особливості датчика (нагрівання елемента, необхідність калібрування).

Формулювання мети дослідження

Завданням роботи є створення апаратно-програмного комплексу, який дозволить переведення аналогового сигналу з датчика MQ-2 у PPM [3], і подальше калібрування показань за допомогою AI.

Виклад основного матеріалу дослідження

Першочерговою задачею є зчитування аналогового значення з датчика, та перевести його у PPM. Для цього спочатку треба звернутись до офіційної документації датчика [2].

Для обчислення ppm використовується експоненційна залежність між параметрами R_s та R_0 апроксимована на основі графіка залежності концентрації газу від відношення опорів сенсора. Ця залежність описується наступною формулою:

$$ppm = a * \left(\frac{R_s}{R_0} \right)^b \quad (1)$$

Де:

R_s – опір датчика в реальному часі

R_0 – опір датчика виміряний в чистому повітрі

a і b – коефіцієнти, які треба підібрати згідно графіка для лінії LPG

Тепер можна визначити коефіцієнти a і b . Треба взяти 2 точки на графіку LPG.

Перша точка $ppm_1 = 200$ на цій точці R_s / R_0 буде дорівнювати 1.7.

Друга точка $ppm_2 = 1000$ на цій точці R_s / R_0 буде дорівнювати 0.785.

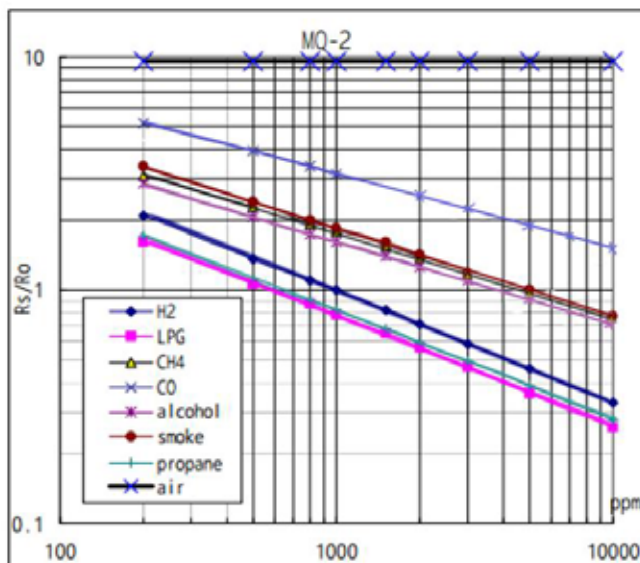


Рис. 1. Графік відношення R_s/R_0 від концентрації газу у PPM

Враховуючи ці значення, можна обчислити коефіцієнти а та b. Щоб знайти коефіцієнти а і b, беремо логарифм бази 10 від обох частин рівняння:

$$\log_{10}(ppm) = \log_{10}(a) + b * \log_{10} \frac{R_s}{R_0} \tag{2}$$

Підставимо значення точок у модель.

Перша точка:

$$\log_{10}(200) = \log_{10}(a) + b * \log_{10}(1.7) \tag{3}$$

Друга точка:

$$\log_{10}(1000) = \log_{10}(a) + b * \log_{10}(0.785) \tag{4}$$

Обчислимо логарифми:

$$\log_{10}(200) \approx 2.301 \tag{5}$$

$$\log_{10}(1000) \approx 3 \tag{6}$$

$$\log_{10}(1.7) \approx 0.23 \tag{7}$$

$$\log_{10}(0.785) \approx -0.105 \tag{8}$$

Складемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} 2.301 = \log_{10}(a) + b * 0.23 \\ 3 = \log_{10}(a) + b * (-0.105) \end{cases} \tag{9}$$

Віднімемо від другого рівняння перше, щоб знайти b:

$$3 - 2.301 = b * (-0.105) - b * 0.23 \tag{10}$$

$$0.699 = b * (-0.105) - 0.23 \tag{11}$$

$$0.699 = b * (-2.083) \tag{12}$$

$$b = \frac{0.699}{-2.083} \approx -0.335 \tag{13}$$

Для визначення значення а, треба підставити отримане значення b:

$$2.301 = \log_{10}(a) + (-2.083) * 0.23 \tag{14}$$

$$2.301 = \log_{10}(a) - 0.479 \tag{15}$$

$$\log_{10}(a) = 2.301 + 0.379 \approx 2.780 \tag{16}$$

$$a = 10^{2.78} \approx 603.99 \tag{17}$$

В результаті а і b обчислені, де a = -2.083 та b = 603.99. Далі треба підставити їх у формулу (1)

$$ppm = 603.99 * \left(\frac{R_s}{R_0} \right)^{-2.083} \tag{18}$$

Далі треба вивести формулу для обчислення R_s та R_0 . Так як формула буде використовуватись для обох значень, буде використовуватись буква R :

$$R = \frac{V_{out}}{V_{cc} - V_{out}} * R_l \tag{19}$$

Де:

V_{out} – вихідна напруга на аналоговому виході.

V_{cc} – напруга живлення датчика. В нашому випадку, це 5 В.

R_l – опір навантаження. Що становить 10 кОм.

Тепер розрахувавши показання R_s та R_0 використавши вищезазначені формули, можна буде отримати правильну концентрацію LPG газу ppm у повітрі.

Наступний крок дослідження – спроба відкалібрувати датчик та зчитати показання в чистому повітрі без використання АІ, щоб в майбутньому можна було порівняти вихідні результати обох підходів. Для цього був розроблений відповідний програмний код для NodeMCU v3. Програмний код доволі об’ємний, тому посилання на нього вказане в списку використаних джерел [4]. Ключовим моментом в калібруванні є визначити опір датчика в чистому повітрі. Програмний код виконує саме цю функцію, після цього починає показувати значення концентрації у ppm. Калібрування займає 30 секунд. За цей час показання стабілізується, датчик прогрівається і показання можна вважати правильними. В таблиці 1 наведені результати зчитування показників без використання АІ.

Таблиця 1

Показання R_s за 30 секунд

Скільки пройдену часу	Опір R_s в момент часу
Elapsed time: 1 seconds	Current R_s : 35.47 kOhms
Elapsed time: 2 seconds	Current R_s : 25.28 kOhms
Elapsed time: 3 seconds	Current R_s : 18.90 kOhms
Elapsed time: 4 seconds	Current R_s : 14.89 kOhms
Elapsed time: 5 seconds	Current R_s : 12.24 kOhms
Elapsed time: 6 seconds	Current R_s : 10.62 kOhms
Elapsed time: 7 seconds	Current R_s : 9.60 kOhms
Elapsed time: 8 seconds	Current R_s : 8.87 kOhms
Elapsed time: 9 seconds	Current R_s : 8.43 kOhms
Elapsed time: 10 seconds	Current R_s : 8.07 kOhms
Elapsed time: 11 seconds	Current R_s : 7.92 kOhms
Elapsed time: 12 seconds	Current R_s : 7.82 kOhms
Elapsed time: 13 seconds	Current R_s : 7.76 kOhms
Elapsed time: 14 seconds	Current R_s : 7.82 kOhms
Elapsed time: 15 seconds	Current R_s : 7.92 kOhms
Elapsed time: 16 seconds	Current R_s : 8.04 kOhms
Elapsed time: 17 seconds	Current R_s : 8.20 kOhms
Elapsed time: 18 seconds	Current R_s : 8.30 kOhms
Elapsed time: 19 seconds	Current R_s : 8.47 kOhms
Elapsed time: 20 seconds	Current R_s : 8.63 kOhms
Elapsed time: 21 seconds	Current R_s : 8.84 kOhms
Elapsed time: 22 seconds	Current R_s : 9.05 kOhms
Elapsed time: 23 seconds	Current R_s : 9.19 kOhms
Elapsed time: 24 seconds	Current R_s : 9.38 kOhms

Закінчення табл. 1

Elapsed time: 25 seconds	Current Rs: 9.52 kOhms
Elapsed time: 26 seconds	Current Rs: 9.67 kOhms
Elapsed time: 27 seconds	Current Rs: 9.90 kOhms
Elapsed time: 28 seconds	Current Rs: 10.02 kOhms

В результаті отримуємо значення $R_0=1.27$. Далі треба заміряти концентрацію газу LPG у повітрі двома приладами. Розробленим апаратно програмним комплексом та професійним приладом NAVOTEST NT601B+. Результати наведені в таблиці 2. Заміри проводились протягом 30 хв в ідентичних умовах. Кожні 5 хвилин береться середнє арифметичне з масиву показань датчика. Тому в фінальній таблиці маємо 6 строк. Іноді на датчики подався газ, щоб порівняти зміну показань. Газ подався в однаковій кількості, та датчики знаходились в абсолютно ідентичних умовах.

Таблиця 2

Порівняння показань розробленого приладу та NAVOTEST NT601B+

Розроблений комплекс	NAVOTEST NT601B+
1.2 ppm	0 ppm
1.34 ppm	1.1 ppm
501.2 ppm	525.1 ppm
215.65 ppm	216.1 ppm
2.4 ppm	0 ppm
1.64 ppm	0 ppm

Враховуючи не дуже високу точність датчика в показаннях до 200 ppm, результати можна вважати дуже хорошими в порівнянні з еталоном.

Тепер знову розглянемо таблицю 1. В ній видно що показання R_s мають деякі хаотичні стрибки. Саме тут можна спробувати використати штучний інтелект, щоб знайти ідеальне значення R_0 . Для цього модифікуємо код [5]. Після зчитування R_s протягом 30 секунд, надсилаємо інформацію до AI (chat-gpt-api) [6] і просимо надати найбільш точне значення R_s , а не просто середнє арифметичне. Після запиту ми отримуємо $R_0=1.6$. Це не сильно відрізняється від минулого значення, тому дослідження можна вважати успішним. Зробимо аналогічні вимірювання як в таблиці 2, з новим значенням опору в чистому повітрі.

Таблиця 3

Порівняння показань розробленого приладу з AI та NAVOTEST NT601B+

Розроблений комплекс	NAVOTEST NT601B+
1.06 ppm	0 ppm
1.39 ppm	1.4 ppm
511.05 ppm	521.3 ppm
208.9 ppm	211.75 ppm
15.03 ppm	3.2 ppm
1.99 ppm	0.5 ppm

Як можна побачити, результати стали більш точні. Тому використання AI у даному приладі можна вважати доцільним.

Висновки та пропозиції

У цьому дослідженні, на основі документації до датчика, було розроблено методику вимірювання газу LPG, за допомогою датчика MQ-2, у величинах ppm. Було виготовлено апаратно-програмний комплекс з використанням AI і без, для корегування показань. Було проведено дослідження по порівнянню показань розробленого апаратно-програмного комплексу з професійним приладом для вимірювання концентрації газу. В майбутньому планується покращувати наведений у статті метод.

Список використаної літератури

1. Bănică, F.-G. (2012). Хімічні сенсори та біосенсори. John Wiley & Sons. URL: <https://doi.org/10.1002/9781118354162>.
2. Mouser Electronics. (н.д.). Технічна документація сенсора MQ-2. URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/321/605-00008-MQ-2-Datasheet-370464.pdf>.

3. Всесвітня організація охорони здоров'я. (2021). Глобальні рекомендації з якості повітря ВООЗ: Тверді частинки (PM2.5 і PM10), озон, діоксид азоту, діоксид сірки та чадний газ. URL: <https://www.who.int/publications/item/9789240034228>.
4. Розроблений програмний код для калібрування і зчитування значення газу LPG у повітрі. (н.д.). URL: https://github.com/MrIcrosI/mq-2-sensor-calibartion-node-mcu/blob/main/sketch_nov24a/sketch_nov24a.ino.
5. Розроблений програмний код для калібрування і зчитування значення газу LPG у повітрі з використанням AI. (н.д.). URL: https://github.com/MrIcrosI/mq-2-sensor-calibartion-node-mcu/blob/main/m2_ai/m2_ai.ino.
6. Chat-GPT API. (н.д.). URL: <https://platform.openai.com/docs/guides/text-generation>.

References

1. Bănică, F.-G. (2012). Chemical sensors and biosensors. John Wiley & Sons. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/9781118354162>
2. Mouser Electronics. (n.d.). Technical data MQ-2 gas sensor. Retrieved from <https://www.mouser.com/datasheet/2/321/605-00008-MQ-2-Datasheet-370464.pdf>.
3. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide. Retrieved from <https://www.who.int/publications/item/9789240034228>
4. Developed program code for calibration and reading LPG gas values in air. (n.d.). Retrieved from https://github.com/MrIcrosI/mq-2-sensor-calibartion-node-mcu/blob/main/sketch_nov24a/sketch_nov24a.ino.
5. Developed program code for calibration and reading LPG gas values in air using AI. (n.d.). Retrieved from https://github.com/MrIcrosI/mq-2-sensor-calibartion-node-mcu/blob/main/m2_ai/m2_ai.ino.
6. Chat-GPT API. (n.d.). Retrieved from <https://platform.openai.com/docs/guides/text-generation>