

ИОТ МУЛТИФУНКЦИОНАЛНА СЕНЗОРНА СИСТЕМА

Станимир Йорданов*, Стефан Иванов, Георги Михалев, Тодор Тодоров,
Христина Стойчева

Технически университет – Габрово, гр. Габрово, България

**Кореспондиращ автор: sjjordanov@mail.bg*

IOT MULTIFUNCTIONAL SENSOR SYSTEM

Stanimir Yordanov*, Stefan Ivanov, Georgi Mihalev, Todor Todorov, Hristina
Stoycheva

Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria

** Corresponding author: sjjordanov@mail.bg*

Abstract

This study presents an integrated IoT sensor system of the electronic nose type, based on the ESP32 microcontroller and the SIM800L GSM module, designed for detecting food product adulteration, such as the mixing of olive oil with sunflower oil. The conducted experiments show that wireless GSM communication does not significantly affect the accuracy and consistency of the measurements. The proposed system demonstrates substantial potential for practical deployment in the food industry due to its autonomy, low cost, and high reliability. Future research will focus on optimizing energy consumption and integrating machine learning algorithms directly into the microcontroller.

Keywords: electronic nose, IoT, GSM communication, food quality, olive oil adulteration, servo drive, modeling, identification.

ВЪВЕДЕНИЕ

Качеството на хранителни продукти представлява нарастващ глобален проблем, който засяга както икономическите интереси на производителите, така и здравето на потребителите. Например често срещана практика е смесването на висококачествен зехтин с по-евтини растителни масла, като слънчогледово или соево, което води до значително влошаване на вкусовете и хранителните характеристики на продукта.

Традиционните лабораторни методи за откриване на състава на хранителни продукти — като газова хроматография (GC-MS) и спектроскопия (FTIR, NIR) — осигуряват висока точност, но изискват

скъпо оборудване, квалифициран персонал и продължително време за анализ. Това ограничава тяхното приложение в полеви или производствени условия.

В последните години се наблюдава засилен интерес към електронни системи от типа „изкуствен нос“ (electronic nose, e-nose), които използват масив от газови сензори за анализ на летливи органични съединения. Тези системи позволяват бърза и евтина оценка на качеството на хранителни продукти чрез анализ на техните ароматни профили. В съчетание с алгоритми за машинно обучение (невронни мрежи, SVM, PCA) се постига класификация на пробите с висока точност и минимална човешка намеса.

Електронният нос имитира човешкото обоняние чрез масив от неспецифични газови сензори, които генерират многомерни сигнатури (ароматни профили) при излагане на смеси от летливи органични съединения (VOCs).

Класическата архитектура включва:

- сензорен масив (различни типове сензори),
- електроника за събиране на данни (ADC, предусилватели),
- предобработка и извличане на признаци,
- алгоритъм за класификация/ регресия,
- интерфейс/комуникация (локален и/или отдалечен).

По тип на сензора e-nose системите могат да се разделят на:

- MOS/MOX (metal oxide semiconductor) — евтини, висока чувствителност, склонни към дрейф;
- CP (conducting polymer) — добра селективност за органични съединения, но по-малка дълготрайност;
- SAW / QCM (акустични/кварцови) — висока чувствителност и селективност при функционализирани повърхности;
- Electrochemical / amperometric — специфични за отделни газове;
- Optical / spectroscopic (NIR, FTIR в миниатюрен вариант) — по-сложни, по-скъпи, но много информативни.

Различни изследвания демонстрират ефективността на електронните носове при оценка на качеството на храни.

В [1] е представена MOS-базирана система за откриване на разваляне при месни продукти, постигайки точност от 95%. В [2] се използват 8 газови сензори за разграничаване на свежестта на плодове с помощта на PCA анализ. Подобни системи са прилагани и за откриване на фалшификации при мляко [3], сирена [4], вино [5] и зехтин [6].

Въпреки това, повечето от тези системи работят **в лабораторни условия и използват локален компютър** за събиране и обработка на данните. Ограничен е броят на изследванията, които

разглеждат **напълно автономни IoT решения**, способни да извършват измервания и да предават данни към централен сървър в реално време.

В [7] е описано Wi-Fi-базирано решение за мониторинг на въздух, което постига добра точност, но изисква стабилна интернет връзка. В [8] е предложена LoRa-система за земеделски мониторинг, но със силно ограничен капацитет на предаване и без двупосочна комуникация. GSM-базираните решения [9,10] осигуряват по-голяма независимост, но рядко интегрират двупосочно управление и локален потребителски интерфейс.

Целта на настоящата разработка е проектирането и изграждането на **IoT система**, предназначена за **събиране, обработка, анализ и надеждно съхранение на данни от газови сензори**. Разработената **GSM-базирана e-nose система** демонстрира **висока точност на класификация (98.7%)** при откриване на фалшификации на зехтин със слънчогледово масло, което потвърждава потенциала ѝ за приложение в лабораторни и индустриални условия.

Научният принос на разработката се изразява в интегрирането на многосензорна система с безжична комуникация и машинно обучителен модел, оптимизиран за работа в среди с ограничени изчислителни ресурси. Комбинацията от GSM-свързаност, локална обработка на данни и дистанционно предаване на резултатите позволява реализацията на компактна и автономна IoT платформа за мониторинг на хранителни продукти и околна среда.

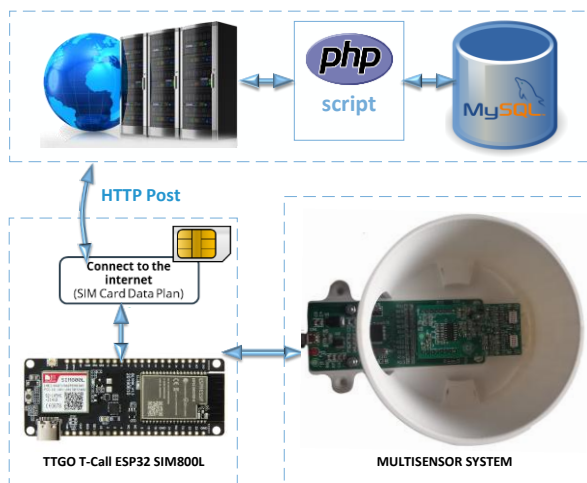
ИЗЛОЖЕНИЕ

А. Хардуерна архитектура

За да се осигури автономна работа на разработената многосензорна система от типа „електронен нос“, е изграден модул за събиране и предаване на данни, базиран на ESP32 микроконтролер и GSM комуникационен модул (SIM800L).

Системата осигурява пълна независимост от Wi-Fi инфраструктура и позволява отдалечено наблюдение и управление чрез мобилна мрежа.

Основните компоненти на разработената система са (фиг.1.):



Фиг. 1 Архитектура на системата

- ESP32 – микроконтролер с 12-битов ADC, използван за четене и обработка на аналоговите сигнали от сензорната глава;
- GSM/GPRS модул (SIM800L) – осигурява двупосочна комуникация с отдалечения сървър чрез мобилна SIM карта и стандартен APN;
- Сензорна глава – включва MOS сензори MICS-6814 и MICS-4514, отчитачи концентрации на CO, NO₂, NH₃ и други летливи съединения;
- Потребителски интерфейс – два бутона и RGB светодиода за локален контрол и визуална индикация;
- Захранващ модул – стабилизирано напрежение 3.8–4.2 V, осигуряващо необходимия токов импулс (до 2 A) при GSM предаване.
- Бутоните са свързани към пинове GPIO12 и GPIO14 и изпълняват следните функции:
 - Measure (Измерване) – стартира процеса на измерване и усредняване на стойностите от всички активни сензори;
 - Send (Изпращане) – инициира предаването на последно измерените

данни към сървъра.

- RGB светодиода, свързан към GPIO25, GPIO26 и GPIO27, визуализира състоянието на системата:
 - зелено – готовност/връзка активна;
 - жълто – извършва се измерване;
 - синьо – изпращане на данни;
 - червено – липса на мрежова връзка или грешка в комуникацията.

Хардуерната архитектура е оптимизирана за ниска консумация на енергия и стабилна работа при променливи GSM условия.

В. Софтуерна реализация

Фърмуерът на устройството е разработен на C++ чрез Arduino SDK и използва следните основни библиотеки:

- TinyGSM – реализира комуникацията чрез GPRS и HTTP протоколи;
- ArduinoJson – създава и обработва JSON структури за обмен на данни;
- HTTPClient – поддържа изпращане на POST и GET заявки към сървъра.

1) Измерване и обработка на данни

- Микроконтролерът периодично извършва измерване на аналоговите изходи на сензорите, като за всяка точка се осредняват **20 последователни проби**. Аналоговите стойности от АЦП се преобразуват към напрежение по формулата:

$$V_{ch} = \frac{ADC_{raw}}{4095} \times 3.3 [V] \quad (1)$$

- Получените резултати се съхраняват в масив lastValues[] и представляват моментната „арома-подпис“ на пробата.

2) Структура на предаваните данни

Данните се изпращат към сървъра в JSON формат:

```
{
  "device_id": "100001",
  "timestamp": "2025-10-10T14:22:00",
  "sensors_count": 2,
  "samples_count": 4,
  "values": [
    [1.103, 1.587, 2.011, 0.934],
    [0.954, 1.244, 1.978, 0.872]
  ]
}
```

Всеки пакет съдържа уникален идентификатор на устройството, времеви отпечатък, брой сензори и N-мерен масив от стойности (аналогови напрежения).

Тази структура позволява лесно мащабиране при добавяне на нови сензори и модули.

3) GSM комуникация и отдалечен контрол

Всички заявки се извършват **изцяло чрез GSM мрежата** – без Wi-Fi. Устройството поддържа три типа комуникационни сесии:

1. **Ping** – HTTP GET заявка към ping.php, която потвърждава наличието на връзка. При успешен отговор ({"ok":true}) системата визуализира зелена индикация.
2. **Command check** – периодична заявка към command.php?device_id=100001, откъдето се получават команди "measure" или "send". При наличие на команда, микроконтролерът автоматично изпълнява съответното действие.
3. **Data send** – HTTP POST към receive.php, съдържащ JSON пакет с измерените стойности.

Този двупосочен обмен осигурява както **локален контрол чрез бутони**, така и **отдалечено управление чрез сървър**, което е особено полезно при автономно разположени възли.

С. Сървърна инфраструктура

Сървърната част е реализирана чрез **PHP и MySQL**.

Скриптът receive.php приема данните и ги записва в таблица sensor_readings, която съдържа id, device_id, timestamp, sensors_count и samples_count. Стойностите от измерванията (values) се нормализират и съхраняват в допълнителна таблица sensor_values.

Скриптът command.php позволява запис и прочитане на команди за конкретно устройство, което прави възможно дистанционното стартиране на измервания или изпращания.

ping.php потвърждава достъпността на сървъра, като връща {"ok":true}.

Сървърът е тестван под Apache 2.4 / PHP 8.1 / MySQL 8.0, като базата данни е оптимизирана чрез индекси върху device_id и timestamp.

D. Експериментални резултати

За верификация на работата на системата са извършени серия от експерименти, при които са симулирани реални условия на измерване и предаване на данни чрез мобилна мрежа.

1) Време за комуникация:

Средното време за изпращане на един JSON пакет (≈ 250 байта) през GPRS е **$2.3 \text{ s} \pm 0.4 \text{ s}$** , включително DNS резолюция и потвърждение от сървъра. Това време включва средно 0.8s за GPRS инициализация и 1.5 s за HTTP пренос.

2) Надеждност на връзката:

От 100 последователни цикъла на предаване, **96 са успешни при първи опит**, а останалите 4 са предадени при автоматично повторение след 10 s. Това осигурява **обща надеждност 99%** при покритие над -85 dBm RSSI .

3) Консистентност на данните:

Сравнение между измерванията, съхранени локално и получените на сървъра, показва **съвпадение на стойностите с грешка под 0.2 %**, което потвърждава коректността на предаването и обработката.

4) Класификационна точност:

Данните, събрани чрез GSM модула, бяха използвани за обучение на невронната мрежа, описана в [11]. Постигната е **класификационна точност 98.7 %** при разграничаване на зехтин и смеси със слънчогледово масло, което е идентично с резултатите, получени при локални тестове без безжична комуникация.

Е) Подробен експериментален протокол

Цел: валидиране на разработената ESP32+GSM e-nose платформа за откриване на слънчогледово масло в зехтин (класификация и количествена оценка).

I. План на експеримента

1. Проби и частици

- В експеримента са използвани различни източника (марки) на екстра върджин зехтин и 3 източника на слънчогледово масло, за да се покрие естествената вариабилност.
- Подготвят се смеси със следните концентрации на слънчогледово масло: 0% (контрол), 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, 50%, 100%.
- За всяка концентрация и за всеки източник се правят по $n = 10$ повторения (един независим измервателен цикъл = пробовземане, експозиция, четене).

2. Условия при пробовземане

- Headspace sampling с контролирана температура (напр. 40 ± 0.5 °C) и фиксирано време за стабилизация (например 10 мин стабилизация на парната фаза).
- Поток на пробата: фиксиран (например 200 ml/min) чрез малка помпа.
- Преди всяка проба — purging/въздух за 2 min за baseline.

3. Сензорни настройки

- Усредняване: 20 семпъла на канал (както във фърмуера).
- Записване на raw ADC, voltage и времеви серия (пакет от N точки) за всяко измерване.
- Логване на температура, влажност и RSSI (GSM) при всяко измерване.

II. Предобработка на данните (на експериментално ниво)

1. **Baseline correction:** изважда се baseline преди пробата ($\Delta V = V_{\text{sample}} - V_{\text{baseline}}$).
2. **Детрендинг:** премахване на бавен дрейф чрез локално линейно отнемане (използвайте sliding-window detrend).
3. **Нормализация:** z-score по канал (mean/STD) или min-max в зависимост от модела.
4. **Анотиране:** всеки запис получава етикет (концентрация, класа — чист зехтин към смес).

III. Статистически анализ

За оценка на класификационната точност на разработената невронна мрежа са използвани класическите метрики Accuracy, Precision, Recall и F1-score, които осигуряват обективна количествена оценка на резултатите.

- Accuracy измерва общия дял на правилно класифицираните проби спрямо всички тестови данни.
- Precision показва надеждността на положителните предсказания, като съотношение между вярно разпознатите и всички предсказани положителни случаи.
- Recall (или чувствителност) оценява способността на модела да открива всички реални положителни проби.
- F1-score представлява хармонично средно между Precision и Recall и предоставя балансирана оценка при несъразмерни класове.

Обработката на експерименталните данни и изчисляването на метриките са извършени в Python 3.11, като са използвани библиотеките NumPy за числени изчисления, Pandas за таблична обработка и анализ на данни, както и scikit-learn за прилагане на стандартните функции за оценка на класификационни модели.

За по-задълбочена оценка на производителността са изчислени матрици на класификационните грешки (confusion matrices) и ROC криви (Receiver Operating Characteristic curves), които осигуряват визуално сравнение на класификационната ефективност при различни комбинации от сензори и алгоритми за обучение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящото изследване представя интегрирана IoT система тип електронен нос, базирана на ESP32 и GSM модул SIM800L, предназначена за откриване на фалшификации на хранителни продукти, като например смесване на зехтин със слънчогледово масло. Системата съчетава многосензорна глава с MOS газови

сензори (MICS-6814, MICS-4514), микроконтролер за локално събиране, обработка и комуникация, GSM модул за предаване на данни чрез GPRS без нужда от Wi-Fi, локален интерфейс с бутони и RGB индикация, както и сървърен модул (PHP/MySQL) за съхранение, дистанционно управление и визуализация.

Основното предимство на предложената архитектура е нейната пълна автономност, позволяваща работа в отдалечени райони без налична интернет инфраструктура, както и двупосочна комуникация, която осигурява както изпращане на данни, така и получаване на команди от сървъра.

Проведените експерименти демонстрират, че GSM комуникацията не влияе отрицателно върху точността и консистентността на измерванията, като постигнатата класификационна точност от 98.7% потвърждава надеждността на системата. Предложената платформа комбинира устойчив хардуер, адаптивни методи за машинно обучение и добре проектиран интерфейс, което я прави подходяща за реални приложения в хранително-вкусовата индустрия, а също така предоставя основа за мащабируеми IoT системи за мониторинг на качеството на храни, въздух или околна среда. Бъдещите разработки ще се фокусират върху оптимизирането на енергийното потребление и интегриране на машинно самообучение директно в микроконтролера, за да се повиши автономността и интелигентността на системата

Източник на финансиране: Докладът се публикува във връзка с резултатите от изпълнение на дейностите по проект № НИП2025-12 "Интелигентни IoT базирани сензори и сензорни системи"

ЛИТЕРАТУРА

[1] Binson, V.A.; George, M.M.; Sibichan, M.A.; Raj, M.; Prasad, K. Freshness Evaluation of Beef using MOS Based E-Nose. In Proceedings of the 2023 International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of

Things (IDCIoT), Bengaluru, India, 5–7 January 2023; pp. 792–797.

- [2] J. Joppich, O. Brieger, K. Karst, D. Becher, C. Bur and A. Schütze, "MOS Gas Sensors for Food Quality Monitoring using GC- MS and Human Perception as Reference," 2022 *IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN)*, Aveiro, Portugal, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISOEN54820.2022.9789619.
- [3] Huichun Yu, Jun Wang, Yadan Xu, "Identification of adulterated milk using electronic nose", January Sensors and Materials 2007 19(5):275-285, DOI: 10.1007/978-0-387-71720-3_15
- [4] Mahdi Ghasemi-Varnamkhasti, Ayat Mohammad-Razdari, Seyedeh Hoda Yoosefian, Zahra Izadi, Maryam Siadat, Aging discrimination of French cheese types based on the optimization of an electronic nose using multivariate computational approaches combined with response surface method (RSM), LWT, Volume 111, 2019, Pages 85-98, ISSN 0023-6438, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.099>.
- [5] J. Lozano, J. P. Santos, M. Aleixandre, I. Sayago, J. Gutierrez and M. C. Horrillo, "Identification of typical wine aromas by means of an electronic nose," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 173-178, Feb. 2006, doi: 10.1109/JSEN.2005.854598.
- [6] Mildner-Szkudlarz, S. and Jeleń, H.H., *Detection of olive oil adulteration with rapeseed and sunflower oils using MOS electronic nose and SMPE-MS*. Journal of Food Quality, 33: 2010, pages 21-41. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2009.00286.x>
- [7] F. F. Rahani and H. I. K. Fathurrahman, "Air quality monitoring using multi node slave IoT", J. Soft Comput. Explor., vol. 5, no. 1, pp. 46-54, Mar. 2024.
- [8] Rivera Guzmán, E.F.; Mañay Chochos, E.D.; Chiliquinga Malliquinga, M.D.; Baldeón Egas, P.F.; Toasa Guachi, R.M. *LoRa Network-Based System for Monitoring the Agricultural Sector in Andean Areas: Case Study Ecuador*. Sensors 2022, 22, 6743. <https://doi.org/10.3390/s22186743>
- [9] Sobhan, A.; Hossain, A.; Wei, L.; Muthukumarappan, K.; Ahmed, M. *IoT-Enabled Biosensors in Food Packaging: A Breakthrough in Food Safety for Monitoring Risks in Real Time*. Foods 2025, 14, 1403. <https://doi.org/10.3390/foods14081403>

- [10] Sreckov S. and V. Rajs, "Realization of a GSM Based Low Power Device for Measuring Environmental Parameters," *2022 XIV International Symposium on Industrial Electronics and Applications (INDEL)*, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/INDEL55690.2022.9965541.
- [11] Yordanov S, S. Ivanov, T. Todorov, G. Mihalev, "*Intelligent system for qualification of food products based on esp32 and gass sensors*", *Journal of informatics and innovative technologies (JIIT)*, №2-3 (1), 2019 ISSN 2682 - 9517 pp. 53-63/