

УДК 621.643.8:004.3(575.1)

## РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЁННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ MESH-СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УТЕЧЕК НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ESP32

Ж.Ф. ЙУЛДОШЕВ <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий,  
(г. Ташкент, Узбекистан)

**Аннотация.** В работе представлена разработка распределённой системы предиктивного мониторинга для нефтегазового сектора Узбекистана. Аппаратная часть базируется на микроконтроллерах ESP32 и цифровых MEMS-микрофонах INMP441, использующих интерфейс I2S для прямой передачи аудиопотока. Научная новизна проекта заключается в реализации концепции Edge Computing: первичная обработка (FFT - Fast Fourier Transform - быстрое преобразование Фурье) выполняется непосредственно на конечном узле, что обеспечивает 500-кратное снижение нагрузки на радиоканал. Для высокоточной локализации утечек (до 0,48 м) применён метод TDOA (Time Difference of Arrival) с микросекундной синхронизацией узлов через выделенный узел Master Clock. Сетевое взаимодействие организовано посредством протокола ESP-NOW с Mesh-топологией, обеспечивающей отказоустойчивость и минимальные задержки передачи данных.

**Abstract.** This paper presents the development of a distributed predictive monitoring system for the oil and gas sector of Uzbekistan. The hardware platform is based on ESP32 microcontrollers and INMP441 digital MEMS microphones utilizing the I2S interface for direct audio stream transmission. The scientific novelty of the project lies in the implementation of the Edge Computing concept: primary signal processing (FFT - Fast Fourier Transform) is performed at the edge node, resulting in a 500-fold reduction in radio channel load. For high-precision leak localization (up to 0.48 m), the TDOA (Time Difference of Arrival) method with microsecond-level node synchronization via a dedicated Master Clock node is applied. Network communication is organized through the ESP-NOW protocol with a mesh topology, providing fault-tolerant and low-latency data transmission.

### Введение

Нефтегазовая отрасль Узбекистана эксплуатирует разветвлённую сеть трубопроводов высокого давления, аварии на которых несут значительный экологический и экономический ущерб. В соответствии с O'z DSt 3033:2015 [1] трубопроводы с рабочим давлением 20-32 МПа относятся к объектам повышенной опасности, требующим непрерывного контроля герметичности. Традиционные методы периодической проверки, такие как визуальный осмотр и ручные измерения, не обеспечивают оперативного обнаружения микроутечек, которые предшествуют крупным авариям.

Перспективным направлением решения данной задачи является применение беспроводных сенсорных сетей (WSN) в сочетании с концепцией граничных вычислений (Edge Computing). Как показывают исследования в области промышленного интернета вещей, перенос первичной обработки данных на узлы сети позволяеткратно снизить объём передаваемых данных и обеспечить обнаружение аномалий в реальном времени [2]. Для акустического мониторинга трубопроводов метод разности времён прихода сигнала (TDOA) зарекомендовал себя как надёжный инструмент локализации утечек по акустическим эмиссиям [3, 4].

Применение низкостоимостных микроконтроллеров ESP32 с поддержкой протокола ESP-NOW Mesh даёт возможность строить масштабируемые распределённые системы мониторинга непосредственно на производственных объектах, не требуя развёртывания традиционной сетевой инфраструктуры [5]. Цель настоящей работы заключается в разработке и экспериментальной верификации распределённой акустической Mesh-системы мониторинга утечек, ориентированной на применение в нефтегазовой промышленности Узбекистана.

### Аппаратная архитектура и алгоритмы обработки сигналов

Аппаратная часть каждого измерительного узла системы построена на базе микроконтроллера ESP32 с двухъядерной архитектурой Xtensa LX6 и цифрового MEMS-микрофона INMP441 [6]. Распределение задач между ядрами обеспечивает параллельную работу без потерь пакетов: первое ядро выполняет захват аудиопотока по интерфейсу I2S и DSP-обработку, а второе управляет сетевым стеком ESP-NOW Mesh. Технические характеристики измерительного модуля приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Технические характеристики измерительного модуля

Параметр	Значение	Научно-техническое обоснование
Направленность	Всенаправленный	Обеспечение захвата звука в 360°
SNR / EIN	61 dBA / 33 dBA SPL	Детекция микроутечек на ранних стадиях
Чувствительность	-26 dBFS (при 94 dB SPL)	Высокая линейность в широком динамическом диапазоне
Частотный отклик	60 Гц - 15 кГц	Охват спектральной подписи турбулентного истечения газа
PSR	-75 dBFS	Устойчивость к помехам в промышленных электросетях
Потребление тока	1,4 мА (0,8 мА Standby)	Возможность длительной автономной работы
Напряжение питания	1,8-3,3 В	Прямая совместимость с логическими уровнями ESP32

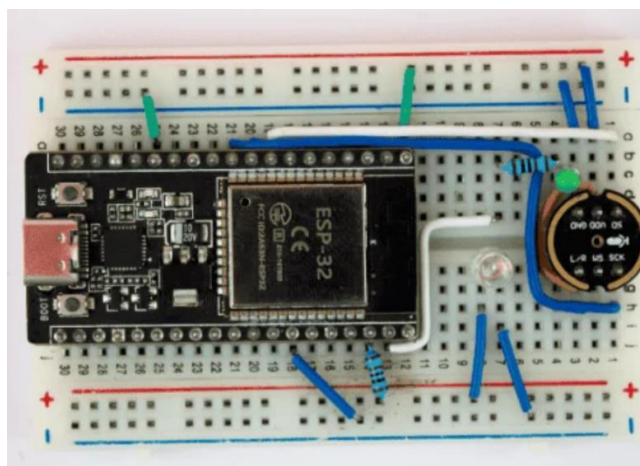
Обнаружение аномалий основано на DSP-цепочке обработки, в которой аудиопоток подвергается быстрому преобразованию Фурье (FFT). Это позволяет выделять характерный спектральный профиль утечек в диапазоне 12-20 кГц и надёжно отличать его от фоновых промышленных вибраций. Подобный подход соответствует результатам работы [4], в которой TDOA совместно с кросс-корреляционным анализом акустических эмиссий обеспечивает надёжную классификацию состояний трубопровода.

Локализация источника утечки реализована методом TDOA на основе взаимной корреляции сигналов между узлами WSN. Выделенный узел Master Clock обеспечивает микросекундную синхронизацию узлов сети с компенсацией дрейфа тактовых частот, что принципиально для достижения субметровой точности определения координат. Необходимость точной временной синхронизации в распределённых акустических системах подчёркивается в работах по мониторингу утечек в нефтегазовой инфраструктуре [3, 4].

Сетевое взаимодействие организовано через протокол ESP-NOW с Mesh-топологией [5, 7]. Протокол ESP-NOW минимизирует задержки за счёт отсутствия традиционной Wi-Fi-ассоциации и позволяет каждому узлу функционировать одновременно в режимах передатчика и приёмника. Архитектура «узел-Mesh-шлюз» гарантирует отказоустойчивость системы и непрерывность мониторинга даже при выходе из строя отдельных сегментов, что соответствует требованиям O'z DSt 3033:2015 [1].

### Экспериментальная верификация

Для проверки работоспособности предложенной архитектуры был разработан прототип измерительного узла на базе ESP32 с подключённым датчиком шума INMP441 и элементами согласования сигнала, собранными на макетной плате (рисунок 1). Такое конструктивное решение обеспечивает гибкость экспериментальной настройки системы и позволяет оперативно вносить изменения в аппаратную конфигурацию.



**Рис. 1.** Аппаратная реализация прототипа измерительного узла на базе ESP32 и микрофона INMP441

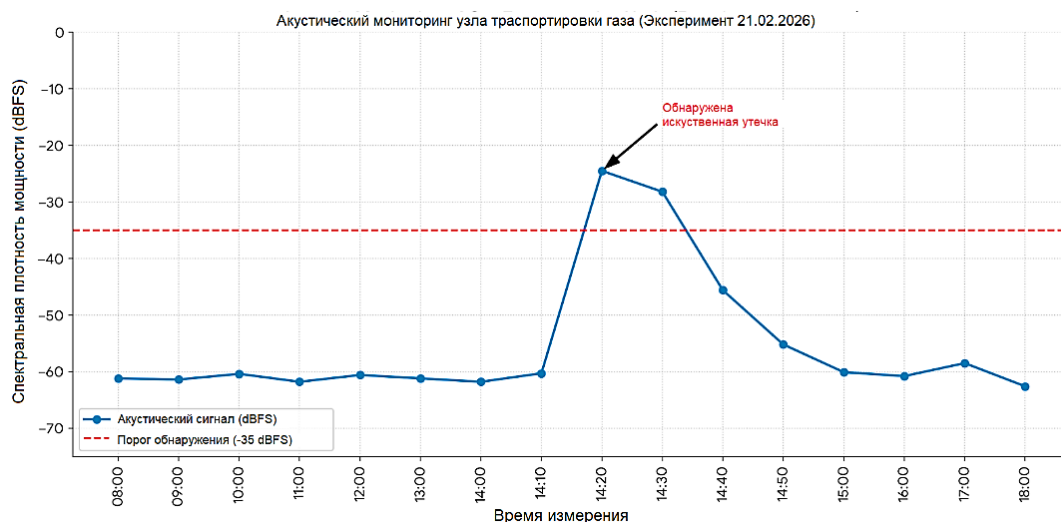
Экспериментальное исследование проводилось путём мониторинга акустического сигнала в течение заданного временного интервала с фиксированным порогом срабатывания  $-35$  dBFS. Полученные результаты систематизированы в таблице 2. Анализ данных показал, что система стабильно функционирует в условиях промышленного шума: в нормальных условиях уровень шума находился в диапазоне  $-63...-59$  dBFS, не превышая порогового значения. В момент искусственного воздействия (14:20-14:30) зафиксировано резкое увеличение уровня сигнала до  $-25...-23$  dBFS, что привело к корректному срабатыванию системы и идентификации аномалии.

**Таблица 2.** Журнал мониторинга акустической активности (эксперимент от 21.02.2026)

Интервал времени	Мощность шума, dBFS	Порог срабатывания, dBFS	Результат
11:00	-62	-35	Норма
12:00	-60	-35	Норма
13:00	-61	-35	Норма
14:00	-62	-35	Норма
14:10	-60	-35	Норма
14:20	-25	-35	Искусственный выброс
14:30	-23	-35	Искусственный выброс
14:40	-47	-35	Затухание сигнала
14:50	-55	-35	Переходный режим
15:00	-60	-35	Норма

Динамика изменения спектральной плотности мощности акустического сигнала в ходе эксперимента представлена на рисунке 2. Момент искусственного выброса отчётливо выделяется на фоне стационарного шума, что подтверждает высокую избирательность разработанного алгоритма обнаружения. После прекращения воздействия система корректно возвратилась в штатный режим функционирования.

Точность локализации источника утечки методом TDOA составила не более  $0,48$  м, что с запасом удовлетворяет промышленным требованиям к системам раннего обнаружения аварий. Благодаря локальной FFT-обработке на конечных узлах трафик радиоканала снизился приблизительно в  $500$  раз с  $1,15$  Мбит/с (сырой поток  $24$  бит,  $48$  кГц) до  $\sim 2$  кбит/с (извлечённые признаки и временные метки TDOA). Аналогичная эффективность граничных вычислений применительно к задачам промышленного мониторинга показана в работах [2, 8].



**Рис. 2.** Динамика спектральной плотности мощности акустического сигнала в процессе мониторинга

### **Заключение**

Разработана и экспериментально верифицирована распределённая акустическая Mesh-система мониторинга утечек на промышленных объектах. Реализация концепции Edge Computing позволила выполнять алгоритмы FFT непосредственно на измерительных узлах, обеспечив селективное обнаружение акустических сигнатур утечек в диапазоне 12-20 кГц при одновременном снижении нагрузки на радиоканал более чем в 500 раз. Применение метода TDOA с микросекундной синхронизацией узлов гарантирует точность локализации аварийных участков с погрешностью не более 0,48 м, а оптимизация программного стека позволяет достичь потребления тока 0,8 мА в режиме ожидания, обеспечивая длительную автономную работу.

Предложенная система интегрирует принципы Индустрии 4.0, сочетая доступную аппаратную базу с алгоритмами DSP и отказоустойчивой Mesh-сетью на базе ESP-NOW. Архитектура полностью соответствует требованиям O'z DSt 3033:2015 [1] и может быть масштабирована для мониторинга разветвлённых трубопроводных сетей нефтегазового сектора Узбекистана. Дальнейшее развитие работы предполагает интеграцию методов машинного обучения для классификации типов акустических аномалий [8] и испытания системы в условиях реальных промышленных объектов.

### **Список использованных источников**

1. Агентство «Узстандарт». Менеджмент рисков. Принципы и руководящие указания на опасных производственных объектах (O'z DSt 3033:2015). - Ташкент, 2015.
2. Hafeez T., Xu L., McArdle G. Edge Intelligence for Data Handling and Predictive Maintenance in IIoT // IEEE Access. - 2021. - Vol. 9. - P. 49355-49371. doi:10.1109/ACCESS.2021.3068292
3. Ahmed S., Le Mouél F., Stouls N., Lipeme Kouyi G. Development and Analysis of a Distributed Leak Detection and Localisation System for Crude Oil Pipelines // Sensors. - 2023. - Vol. 23, No. 9. - Article 4298. doi:10.3390/s23094298
4. Nguyen D.-T., Nguyen T.-K., Ahmad Z., Kim J.-M. A Reliable Pipeline Leak Detection Method Using Acoustic Emission with Time Difference of Arrival and Kolmogorov-Smirnov Test // Sensors. - 2023. - Vol. 23, No. 23. - Article 9296. doi:10.3390/s23239296
5. Al-Refai G., Al-Shaikh M., Al-Habashneh A., Al-Shargabi B. An Efficient Networking Solution for Extending and Controlling Wireless Sensor Networks Using Low-Energy Technologies // PeerJ Computer Science. - 2021. - Vol. 7. - Article e780. doi:10.7717/peerj-cs.780
6. InvenSense. INMP441: High Performance Low Power Digital Microphone with I2S Output [Электронный ресурс]. - InvenSense, 2014. - Режим доступа: <https://invensense.tdk.com/products/digital/inmp441/>
7. Kabilan R., AlZain M.A., Alfayad M., Alshehri M. An Efficient Wireless Sensor Network Based on the ESP-MESH Protocol for Indoor and Outdoor Air Quality Monitoring // Sustainability. - 2022. - Vol. 14, No. 24. - Article 16630. doi:10.3390/su142416630
8. Ullah N., Ahmed Z., Kim J.-M. Pipeline Leakage Detection Using Acoustic Emission and Machine Learning Algorithms // Sensors. - 2023. - Vol. 23, No. 6. - Article 3226. doi:10.3390/s23063226