

SECTION 10.

COMPUTER AND SOFTWARE ENGINEERING

Богдан Сергій Анатолійович 

здобувач ступеня доктора філософії

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Науковий керівник: Зеленков Андрій Вікторович

канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

Забруднення атмосферного повітря є однією з найсерйозніших екологічних загроз для здоров'я людини. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, щорічно понад 7 мільйонів передчасних смертей спричинені забрудненням повітря, що провокує серцево-судинні захворювання, хронічні обструктивні захворювання легень та онкологію. Традиційний моніторинг базується на мережі стаціонарних станцій з високоточними аналітичними приладами, вартість яких становить 50-200 тисяч доларів на одиницю. Це суттєво обмежує щільність покриття - як правило, одна станція на район міста - і унеможливує виявлення локальних джерел забруднення та оперативне реагування на надзвичайні ситуації. В Україні державна мережа охоплює лише 162 стаціонарні пости у 53 містах, що є явно недостатнім в умовах зростаючого антропогенного навантаження [1].

Мета роботи - огляд архітектурних рішень та ключових технологічних компонентів IoT-систем моніторингу атмосферного повітря, а також аналіз методів машинного навчання для підвищення якості вимірювань і прогнозування рівнів забруднення.

Розвиток технологій Інтернету речей (IoT) відкрив принципово нові можливості для побудови розподілених систем моніторингу. IoT-системи дозволяють створювати щільні мережі недорогих автономних сенсорних вузлів вартістю 100-1000 доларів, що на два порядки дешевше традиційних рішень. Типова IoT-станція включає набір мініатюрних сенсорів (PM2.5, PM10, CO₂, NO₂, O₃, VOC), мікроконтролер для обробки даних, модуль

бездротової комунікації та систему автономного живлення [2].

Сучасна IoT-система моніторингу будується на багаторівневій архітектурі, що включає чотири рівні. Рівень сприйняття - це розподілені сенсорні вузли з GPS-модулями, що здійснюють безперервні вимірювання параметрів якості повітря. Мережевий рівень забезпечує передачу даних через комунікаційні технології - LoRaWAN, NB-IoT, WiFi або 4G/5G - залежно від умов розгортання. Рівень обробки реалізується як у хмарі, так і на периферії мережі та включає фільтрацію, валідацію, агрегацію даних і виконання ML-моделей. Рівень застосунків охоплює веб- і мобільні інтерфейси, аналітичні панелі та системи сповіщень при перевищенні порогових значень.

Гібридний підхід з використанням граничних обчислень (Edge Computing) забезпечує обробку критичних даних з мінімальною затримкою при збереженні переваг хмарної аналітики. Типові функції Edge-обробки включають первинну фільтрацію та валідацію даних, агрегацію вимірювань за часовими вікнами, детектування аномалій та локальне сповіщення при критичних перевищеннях порогів. Правильно спроектована система з LoRaWAN-комунікацією та батареєю ємністю 10000 mAh може працювати автономно 1-2 роки при вимірюваннях кожні 5 хвилин.

Одним із ключових інноваційних підходів є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як мобільних носіїв вимірювального обладнання. БПЛА дозволяють отримувати дані про вертикальний розподіл забруднень, здійснювати моніторинг у важкодоступних місцях та безпосередньо у шлейфах викидів від промислових і авіаційних джерел. Це забезпечує якісно іншу просторову повноту картини забруднення порівняно зі стаціонарними постами [3].

Основною технічною проблемою IoT-систем залишається недостатня точність low-cost сенсорів. Похибка вимірювань комерційних сенсорів PM_{2.5} може сягати 20-40% відносно референсних методів через перехресну чутливість до інших газів, температурну залежність та деградацію з часом. Методи машинного навчання - зокрема Random Forest, XGBoost та LSTM-нейронні мережі - дозволяють зменшити середньоквадратичну похибку вимірювань з 15-20 мкг/м³ до 5-8 мкг/м³. ML-калібрування підвищує точність сенсорів на 15-30% порівняно із заводськими налаштуваннями та враховує температуру, вологість, концентрації інших забруднювачів і старіння сенсора [4].

Прогнозування концентрацій забруднювачів на горизонт від 1 години до 7 діб використовується для завчасного попередження населення про погіршення якості повітря. Рекурентні нейронні мережі LSTM та

трансформери досягають точності $R^2 > 0,85$ для горизонту 24 години. Виявлення аномалій на основі автоенкодерів та алгоритму Isolation Forest дозволяє в реальному часі ідентифікувати несправності сенсорів або надзвичайні події - пожежі, промислові викиди.

Окрему увагу слід приділити якості даних у розподілених мережах з тисячами сенсорів. Основні проблеми охоплюють точність вимірювань, повноту даних при збоях зв'язку, узгодженість між сенсорами та своєчасність передачі. Методи вирішення включають просторово-часову валідацію, об'єднання даних з різних джерел (data fusion) із супутниковими спостереженнями, резервування критичних вузлів та статистичне детектування аномалій.

Впровадження IoT-рішень збільшує щільність точок контролю у 10-100 разів порівняно з традиційними системами при зниженні вартості вузла у 20-50 разів. Це критично важливо для України, де наявна мережа державних станцій є недостатньою для адекватної оцінки ситуації. Інтеграція машинного навчання підвищує точність низьковартісних сенсорів до рівня, придатного для прийняття управлінських рішень. Подальші дослідження будуть зосереджені на розробці адаптивних стратегій вимірювання для оптимізації енергоспоживання, федеративному навчанні ML-моделей без централізації даних та інтеграції з екосистемами розумних міст.

Список використаних джерел:

1. Garcia, A., Saez, Y., Harris, I., Huang, X., & Collado, E. (2025). Advancements in air quality monitoring: a systematic review of IoT-based air quality monitoring and AI technologies. *Artificial Intelligence Review*, 58, 275. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11277-9>
2. Collado, E., Calderón, S., Cedeño, B., De León, O., Centella, M., García, A., & Sáez, Y. (2024). Open-source Internet of Things (IoT)-based air pollution monitoring system with protective case for tropical environments. *HardwareX*, 19, e00560. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2024.e00560>
3. Manfreda, S., McCabe, M. F., Miller, P. E., & et al. (2018). On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring. *Remote Sensing*, 10(4), 641. <https://doi.org/10.3390/rs10040641>
4. Ramadan, M. N. A., Ali, M. A. H., Khoo, S. Y., Alkhedher, M., & Alherbawi, M. (2024). Real-time IoT-powered AI system for monitoring and forecasting of air pollution in industrial environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 283, 116856. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116856>