

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

УДК: 004.043

Oleksandr Trofymchuk, Corresponding member of the National Academy of Sciences of Ukraine, doctor of technical sciences, professor, Director of the Institute
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274>

Victoria Itskovych, PhD, Junior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1351-8178>

Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

METHOD OF PROCESSING INFORMATION ABOUT THE STATE OF THE ENVIRONMENT BASED ON DATA OBTAINED THROUGH A SERVICE-ORIENTED NETWORK

Abstract. *The task of the work is to develop a method of processing information about the state of the environment based on data received from a service-oriented network based on energy-efficient long-range protocols. As an example of the implementation of the method, the LoRaWAN technology was chosen, which is used in the city of Kyiv, in particular, to ensure the operation of "Kyiv Digital" services.*

The solution to the problem lies in finding such a processing method that allows you to present the data received from the transmitters as a set. From this multiplication, with the help of a special symbolic language, data is extracted from which a pool is formed to present information about events at the research object. The latter is proposed to be implemented through an information convolution where information is separated by levels depending on the end user's request. The resulting rollup is not saved, since the primary information remains in the system database and can be used for subsequent requests for analysis or comparison.

This can be used in systems working with big data to control the current state of information processing, create samples for intermediate calculations, statistical studies and generalizations of the state of processes whose action is not completed.

Key words: *digital city; Internet of Things; LoRaWAN; monitoring; information convolution; request; information provider.*

О.М. Трофимчук, В.Є. Іцкович

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, Київ, Україна

МЕТОД ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ПРО СТАН ДОВКІЛЛЯ НА ОСНОВІ ДАНИХ, ОТРИМАНИХ ЧЕРЕЗ СЕРВІС-ОРІЄНТОВАНУ МЕРЕЖУ

***Анотація.** Задачею роботи є розробка методу обробки інформації про стан довкілля на основі даних, отриманих від сервіс-орієнтованої мережі на базі енергоефективних протоколів далекого радіусу дії. Для прикладу реалізації методу обрана технологія LoRaWAN, яка застосовується в м. Київ, зокрема, для забезпечення роботи сервісів «Київ цифровий».*

Вирішення поставленої задачі полягає у знаходженні такого методу обробки, який дозволяє представити отримані дані від давачів як деяку множину. З цієї множини за допомогою спеціальної символічної мови виленовуються дані, з яких формується пул, для представлення інформації про події на об'єкті дослідження. Останнє запропоновано реалізувати через інформаційну згортку, де відбувається виленування інформації за рівнями в залежності від запиту кінцевого користувача. Отримана згортка не зберігається, оскільки первинна інформація залишається в базі даних системи і може бути використана за наступними запитами для аналітики чи порівняння.

Зазначене може бути використане в системах, що працюють з великими даними, з метою контролю поточного стану обробки інформації, створення вибірок для проміжних розрахунків, статистичних досліджень та узагальнень стану процесів, дія яких не завершена.

***Ключові слова:** цифрове місто; Інтернет речей; LoRaWAN; моніторинг; інформаційна згортка; запит; давач інформації.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.117-129>

Вступ

Розробка інформаційної технології (ІТ), яка дозволяє на основі сервіс-орієнтованої мережі отримувати та обробляти велику кількість даних про стан підключених об'єктів і систем, є актуальним завданням сьогодення. Найвідоміші приклади реалізації такої технології – «розумне» або цифрове місто [1], «розумний дім» [2] з різноманітним застосуванням концепції Інтернету речей (ІоТ) [3]. В основу інформаційної технології на основі сервіс-орієнтованої мережі закладено інформаційний обмін (передачу інформації) від давачів-джерел інформації до серверів, розташованих на значній відстані від об'єкта спостереження. На цих серверах відбувається отримання, систематизація та обробка інформації в залежності від вимог кінцевого користувача. Отримання інформації від сервіс-орієнтованої мережі може розглядатися як розробка підсистеми моніторингу діяльності деякої складної системи з чітко визначеними параметрами та обмеженнями для виконання прогнозованих задач у заданий час. Таке твердження впливає із розуміння сервіс-орієнтованої архітектури (SOA) як модульного підходу до розробки програмного забезпечення зі змінними компонентами [4] та функціонального сервісу реального часу у вигляді вебзастосунку [5]. А враховуючи сучасне розуміння ІоТ [3] як універсального поєднання фізичних пристроїв [6] в мережу із можливістю розміщення вбудованих передавачів інформації та програмного забезпечення для передачі та обміну даними [7], можна

концепцію IoT розглядати як базову для комплексної взаємодії окремих пристроїв в мережі, орієнтованої для вирішення окремих задач складної системи, де замість купи операторів, які слідкують кожен за своєю ділянкою роботи, «працюють» датчики, що моніторять стан та передають дані на сервер для обробки. Такий підхід вже використовують великі промислові підприємства [6], бо це дозволяє не лише вирішити проблему енерговитратності, а й принести окремий прибуток за рахунок пришвидшення обміну інформації для прийняття управлінських рішень [8].

І тут варто зазначити, що проблема енергоефективності є одним з головних пріоритетів сучасного мегаполісу [9]. А блек-аути останніх часів, пов'язані з активною фазою вторгнення військ російської федерації на територію України, довели, наскільки це питання є актуальним. Тепер жоден проєкт, жодна робота комунальних служб чи організацій сфери забезпечення не розпочинається без оцінки енерговитрат.

Проте, коли стоїть задача забезпечення безпеки життєдіяльності будь-якого населеного пункту, а, особливо, великого міста, проблема енергоефективності дещо відходить на другий план [10], хоча не зникає, а підсилює свої акценти [11]. А об'єднати ці питання одним комплексним рішенням дозволяє об'єднання міських комунікацій, інформаційних технологій передачі даних, пристроїв IoT в рамках системи «розумного міста» (Smart City) [12].

Безпека життєдіяльності «розумного міста» включає у себе важливий фактор – забезпечення екологічних параметрів функціонування мегаполісу. Тому в автоматизованих системах функціонування «розумного міста» здійснюється постійний моніторинг стану повітря, особливо стосовно роботи підприємств та викидів від автомобілів, води і ґрунту, з контролем гранично допустимих концентрацій (ГДК) основних забруднювачів, стану зон відпочинку, техногенного навантаження на вулицях і проспектах, відслідковування залежностей між трафіком транспорту, кліматичними умовами та впливом на показники життєдіяльності.

За допомогою подібної IT на основі сервіс-орієнтованої мережі отримується та передається велика кількість даних на значні відстані. Тому актуальним питанням є розробка таких методів та підходів обробки інформації, які дозволяють створювати вибірки за необхідними параметрами, що відображають стан системи, відносно якої здійснюється моніторинг, і ця обробка повинна відбуватися в режимі реального часу з мінімальними втратами даних.

Постановка задачі

Задача роботи полягає у розробці методу обробки інформації про стан довкілля на основі даних, отриманих від сервіс-орієнтованої мережі на базі енергоефективних протоколів далекого радіусу дії. У теперішній час виділяють чотири передові технології IoT, які є актуальними через низьку потужність глобальних мереж (LPWAN). Якщо порівнювати це з технологіями, наприклад мережевого або бездротового зв'язку малого радіусу дії, то LPWAN може забезпечити підключення на значні відстані приладів IoT з низьким енергоспоживанням та швидкістю передачі даних [13]. Для вирішення питань збору та передачі інформації про стан довкілля з можливістю подальшої обробки задля активізації/коригування дій

різноманітних служб, що відреагують на ситуацію, яка склалася, міста використовують LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M, SigFox [44]. Для прикладу реалізації методу обрана технологія LoRaWAN, яка застосовується в м. Київ для забезпечення роботи міських сервісів.

Вирішення поставленої задачі полягає у знаходженні такого методу обробки, який дозволить представити отримані дані від давачів як деяку множину. З цієї множини за допомогою спеціальної символічної мови вичленюються дані, з яких формується пул, для представлення інформації про події на об'єкті дослідження.

Під пулом в інформаційних технологіях розуміється набір фізичних чи віртуальних об'єктів для виконання однієї спільної функції [14]. Інформація пулу обробляється за запитом та представляється у затребуваній користувачем формі. Після цього її збереження не обов'язкове, адже множина первинних даних знаходиться в базі даних і в будь-який момент можна зробити новий запит на створення пулу.

Створення такої вибірки інформації може базуватися на наявних у базі даних записах щодо об'єкта спостереження. Для цього можна використовувати технологічні карти та мережні графіки процедур, що входять до стандарту специфікації LoRaWAN.

Вирішення поставленої задачі

Сукупність знань про стан довкілля мегаполісу наведена у різноманітних нормативно-правових актах, звітах, розпорядженнях, аналітичних записках та інших документах департаментів та служб. Їх можна представити як початкову інформацію підсистеми спостереження за станом параметрів середовища міста і представити формально як суму записів у базі даних, яка використовується для роботи окремих сервісів мережі, як дані про наявні ресурси (X), які мають вплив на забруднення території; норми, регламенти та протоколи роботи (НРП), тобто обмеження, з порушенням яких можуть виникнути ситуації щодо перевищення ГДК (Y), та власне записи моніторингу на основі показників давачів інформації про стан об'єкта, за яким відбувається спостереження (набір даних від давачів) (Q):

$$X(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^n x_i(a, b, c, d), \quad (1)$$

на множині записів про ресурси $I = \{ i \mid 1 \leq i \leq n \}$,

де: a – вид, найменування ресурсу, що впливає на стан довкілля;

b – кількість джерел забруднення;

c – структурна належність цих джерел до об'єкту забруднення;

d – значення показника від давача на момент часу t .

Аналогічно можна представити запис щодо застосування норм, регламентів та протоколів у разі виникнення ситуації з перевищенням ГДК забруднювача. Тобто, на множині записів про НРП $J = \{ j \mid 1 \leq j \leq m \}$:

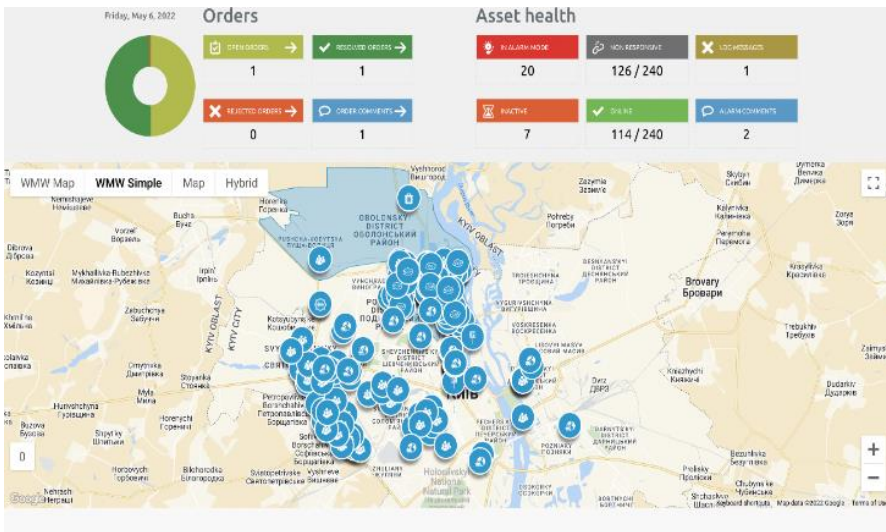
$$Y(a, c, d, e) = \sum_{j=1}^m y_j(a, c, d, e), \quad (2)$$

де: e – значення показника від давача, який перевищує ГДК.

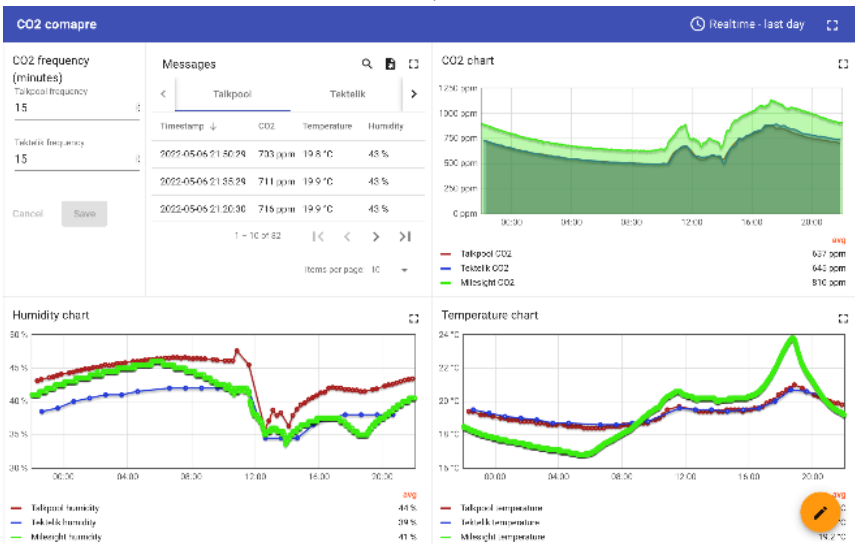
Відповідно, значення, що надходять від давача, можуть бути представлені у вигляді вибірки на множині записів про наявні результати спостереження, тобто, $Q = \{ q \mid 1 \leq i \leq l \}$:

$$Q(a, c, d, e) = \sum_{q=1}^l q_j(a, c, d, e). \quad (3)$$

Проте записів, описаних моделями (1)–(3), у базі даних може бути велика кількість по всьому місту, як це реалізовано на прикладі системи моніторингу стану довкілля у Києві (рис. 1, а). Крім того, від кожного давача у визначений момент часу надходять дані, які фіксують окремі параметри, що досліджуються (рис. 1, б), збільшуючи міру інформаційної ентропії [15].



а)



б)

Рис. 1. Система моніторингу стану довкілля м. Києва: а – розташування давачів інформації; б – фіксація результатів, що надходять від давачів

У цьому випадку мірою невизначеності інформації E , що надходить до сервера на обробку, може виступати показник відношення загальної суми неповних записів у базі даних про ресурси, НРП та показники стану довкілля на визначений момент часу, до ідеально повної бази даних:

$$E(x, y, q) = (\sum_{i=1}^n x'_i + \sum_{j=1}^m y'_j + \sum_{q=1}^l q'_j) / \sum_{i=1}^n xyq, \quad (4)$$

що підсумовуються по означених множинах записів $I = \{ i | 1 \leq i \leq n \}$, $J = \{ j | 1 \leq j \leq m \}$, $Q = \{ q | 1 \leq q \leq l \}$. Якщо $E(x, y, q) \rightarrow 0$, то виникає проблема невизначеності знань про поточний стан об'єкта і необхідно сформулювати додатковий пул інформації шляхом відправки запиту до давача (додаткове опитування давача). При $E(x, y, q) \rightarrow 1$ підвищується визначеність і наявної інформації є достатньо, проте додатковий пул інформації формується за необхідністю. У разі $E(x, y, q) = 1$ існує достатня кількість інформації про стан об'єкта. У цьому разі додаткових опитувань давачів не відбувається і використовується наявна інформація про стан об'єкта спостереження. Наявний пул після використання не зберігається. Проте, за наведеним підходом інформацію слід вичленувати, обробити та представити таким чином, щоб вона була достовірною, точною і не призводила до дублювання чи повторів [16], збільшуючи, тим самим, міру ентропії.

Застосування інформаційної згортки

Припустимо, що для задач контролю необхідно зробити вибірку даних, що характеризують стан повітря за обмежений період часу (доба, тиждень, місяць). Ця вибірка повинна утримувати змістовні дані, що характеризують стан повітря по районах, середні та максимальні показники по місту в цілому, а також порівняти дані з обраними аналогічними періодами та надати інформацію про результати вимірів за локаціями давачів.

Сервіс-орієнтована мережа передає інформацію від давачів через рівні проміжки часу за замовчанням. За необхідності, як було зазначено вище, використовується опитування давачів для підтвердження чи спростування інформації. Орієнтуючись на наявні записи у базі даних протягом доби, можна отримати інформацію від ІТ щодо безпеки повітря в місті: $F^i_{міста} = f_{IT}(x, y, q)$. Тобто, функція безпеки цифрового міста на деякий момент часу є функцією системи надати вибірку точної інформації про забруднювачі (X), протоколи роботи (Y) та дані від давачів (Q), що розташовані в різних локаціях мегаполісу. Виходячи із зазначеного, поточний стан системи, що підлягає моніторингу ($X_n; Y_n; Q_n$), можна представити у вигляді символічної матричної форми (рис. 2), де об'єкт спостереження (у даному випадку – стан повітря в місті) характеризується з трьох точок зору:

- а) (X_o, Y_o, Q_o) – з точки зору санітарних нормативів та ГДК;
- б) (X_I, Y_I, Q_I) – за результатами виміру на конкретний момент часу;
- в) (X_n, Y_n, Q_n) – з точки зору поточних значень за визначений період (доба, тиждень, місяць).



Рис. 2. Матрична форма представлення інформаційної згортки про стан повітря в місті

Системною вимогою для ступеня деталізації та агрегації інформації інформаційної згортки у наведеному випадку (рис. 2) буде вимога щодо відображення пов'язаної інформації щодо повітря по місту в цілому та за окремими районами, завдяки чому можна провести порівняння з візуалізацією результатів.

В процесі функціонування міста значення позицій матриці (стан повітря) буде коригуватися за даними моніторингу. Таким чином, первинні дані моніторингу за допомогою символічної матричної форми їх відображення перетворюються на візуальну модель за окремими параметрами.

Когнітивне навантаження запропонованої матричної символічної форми полягає в універсальності, яка дає можливість порівнювати різнопланові напрямки діяльності підсистем однієї системи, за якою здійснюється моніторинг роботи. Наприклад, можна побудувати матричну згортку за піковими навантаженнями, коли повітря в місті починає перевищувати встановлені ГДК, або зробити вибірку за локаціями встановлених давачів і оцінити навантаження на район від забруднюючих викидів. Вибір відносних одиниць виміру показників ситуації (X, Y, Q) дає можливість порівнювати ситуацію не просто стану повітря по районах міста, а у різнопланових базових процесах функціонування мегаполісу, як-то завантаження транспортних розв'язок або робота промислових підприємств.

Практична реалізація методу обробки інформації за допомогою згортки

Отримання та подальша обробка даних від давачів, підключених до сервіс-орієнтованої мережі LoRaWAN, передбачає інтеграцію і взаємодію низки незалежних програмно-апаратних комплексів, сервісів, систем, програмного забезпечення. Їх мета – реалізація автоматизованих сценаріїв та надання подальшого використання інтеграцій через опис способів взаємодії (API) та програмного управління апаратними компонентами міської інфраструктури.

Щоб побудувати на цій основі сервіс обробки інформації за допомогою згортки, можна застосувати правило рекурсивного копіювання, як це

використовується в деяких мовах програмування [17]. Застосування рекурсії обумовлено тим, що технологія змін при обробці інформації в послідовності процедур цієї моделі є за структурою та змістом алгоритмом, до якого можливо застосувати деякі правила та методи [18] і адаптувати алгоритм за підходом Тюрінга [19]. Так, з огляду на залежності (1)–(3), представлено трансформується у модель (4), яка визначає правило виклику рекурсивних копій для складних процедур виконання згортки шляхом трансформації списків чи кортежів інформації, які пов'яжуть в собі представлення події за низкою показників з врахуванням періодів, або параметрів на різних часових інтервалах, що характеризують стан об'єкта спостереження. Щоправда, подібна модель може створити системну затримку інформації (Т) в кожному контурі вибору необхідної інформації для інформаційної згортки:

$$T_n = T_3 + (T_2 + T_1) n, \tag{5}$$

де: $T_{1,2,3}$ – ознаки часового контуру вибірки,
 n – число рівнів ієрархії інформації (даних, що необхідні для формування згортки).

Описаний метод був реалізований в інформаційно-телекомунікаційній системі «Платформа великих даних» шляхом створення сервісу представлення аналітики щодо екологічного стану в місті та відображення у модулі «Інформаційні панелі» підсистеми бізнес-аналітики у вигляді дашбордів. Під дашбордом в даній роботі розуміється вебдокумент, який дозволяє лаконічно представити дані за вибіркою з інфографікою та короткими звітами та порівняннями. Основною метою для впровадження у практику зазначеного методу було забезпечення збереження всіх даних, що надходять у сховище ІТС від давачів інформації, та обробка даних від екологічних сенсорів Oizom Polludrone та Talkpool OY1210 зі збереженням та візуалізацією.

Функціональні елементи інтеграції окремих пристроїв, від яких збиралася інформація для наступного формування інформаційної згортки, наведені на рис. 3.

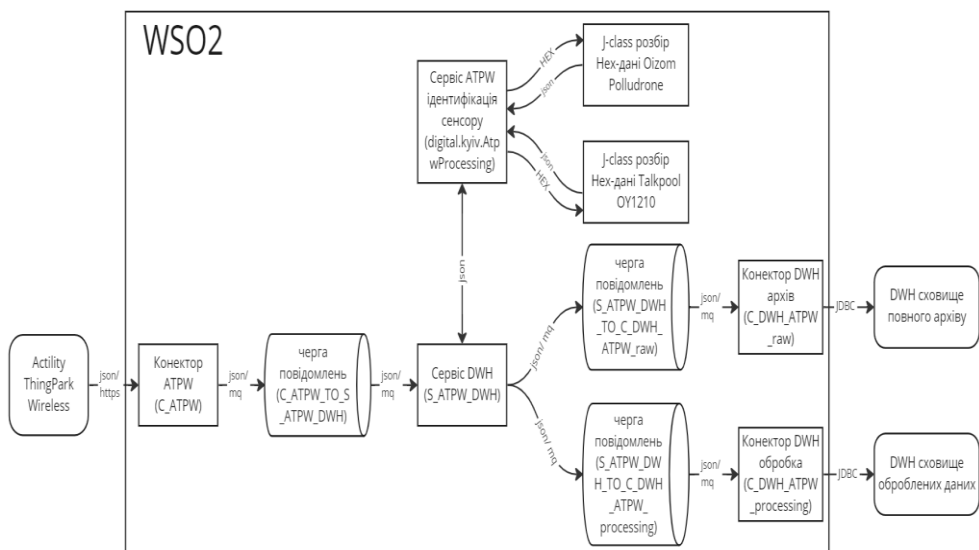


Рис. 3. Елементи інтеграції ІТС «Платформа великих даних»

Складовими частинами інтеграційної схеми (рис. 3) виступили:

- IC Actility ThingPark Wireless – джерело даних (давачі інформації);
- конектор ATPW (C_ATPW) – забезпечує прийом даних від IC ATPW та збереження у внутрішній черзі повідомлень C_ATPW_TO_S_ATPW_DWH для подальшої обробки за розробленим методом;
- черга повідомлень C_ATPW_TO_S_ATPW_DWH – зберігає вхідні повідомлення для подальшої їх обробки;
- сервіс DWH (S_ATPW_DWH) – призначений для передачі необроблених даних для користувача DWH та підготовки оброблених даних для користувача DWH та їх збереження у внутрішніх чергах S_ATPW_DWH_TO_C_DWH_ATPW_raw та S_ATPW_DWH_TO_C_DWH_ATPW_processing;
- сервіс ATPW ідентифікація сенсора (digital.kyiv.ATPWProcessing) – призначений для визначення типу сенсора за його унікальним ідентифікатором та для розбору закодованих в HEX-форматі даних від сенсорів Oizom Polludrone та Talkpool OY1210;
- черга повідомлень S_ATPW_DWH_TO_C_DWH_ATPW_raw – зберігає необроблені дані для користувача DWH;
- черга повідомлень S_ATPW_DWH_TO_C_DWH_ATPW_processing – зберігає оброблені дані для користувачів DWH;
- конектор DWH архіву (C_DWH_ATPW_raw) – призначений для передачі повідомлень з черги повідомлень S_ATPW_DWH_TO_C_DWH_ATPW_raw користувачу DWH автоматично при появі повідомлення у черзі. Дані зберігаються в таблиці необроблених даних;
- конектор DWH обробки (C_DWH_ATPW_processing) – призначений для передачі повідомлень з черги повідомлень S_ATPW_DWH_TO_C_DWH_ATPW_processing користувачу DWH автоматично при появі повідомлення у черзі. Дані зберігаються в таблиці оброблених даних;
- сховище даних DWH – утримує кінцеву згортку обробленої інформації, яка візуалізована для кінцевого користувача на дашборді.

Безпосередньо процес обробки інформації про стан довкілля, яка отримується через сервіс-орієнтовану мережу, відбувається за наступним алгоритмом (див. рис. 3):

- 1) отримуються та обробляються дані з черги повідомлень C_ATPW_TO_S_ATPW_DWH;
- 2) надсилається отримане повідомлення без обробки до черги повідомлень S_ATPW_DWH_TO_C_DWH_ATPW_raw;
- 3) DWH звертається до сервісу ATPW щодо ідентифікації давача інформації і передає йому отримане повідомлення без обробки;
- 4) від сервісу ATPW отримується відповідь про ідентифікацію сенсора згідно зі стандартним протоколом опису оброблених даних ATPW;
- 5) в разі отримання типу сенсора «unknown» обробка даних припиняється;
- 6) в разі отримання помилки, сервіс вносить інформацію про помилку в систему логування і обробка даних припиняється;
- 7) в разі отримання типу сенсора «есо» сервіс надсилає дані до черги повідомлень S_ATPW_DWH_TO_C_DWH_ATPW_processing;
- 8) після перевірки кроків 5 – 7 сценарій переходить до обробки наступного повідомлення у черзі повідомлень C_ATPW_TO_S_ATPW_DWH.

По закінченні циклу обробки повідомлень алгоритм переходить до стадії формування згортки, яка передається до тимчасово виділеної комірки у сховищі даних DWH. У підсумку інформаційна згортка візуалізується на дашборді (рис. 4).

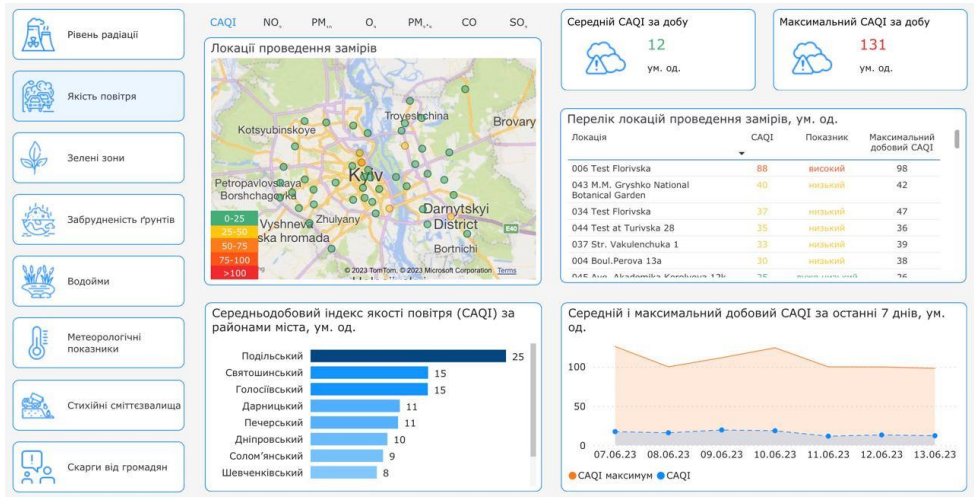


Рис. 4. Візуалізація отриманої інформаційної згортки на прикладі даних про стан повітря в м. Київ

Однією з особливостей розробленого сервісу є визначення приналежності дачача інформації до типу «есо», що відбувається на основі DevEUI сенсора. Це є унікальний ідентифікатор для пристрою в мережі LoRaWAN, подібний до MAC-адреси для пристрою TCP/IP. Завдяки чому чітко визначається локація дачача та виключається дублювання чи втрата даних в загальному масиві записів у базі даних. Для решти сенсорів системи, що не задіяні в моніторингу повітря, встановлюється тип «unknown».

Для «есо»-сенсорів сервіс звертається до відповідного Java-класу об'єктів у ІТС «Платформа великих даних» в залежності від виробника дачача, який проводить розбір HEX-даних (спеціальний формат файлу, що надає дані у текстовому вигляді). Java-клас отримує запит у форматі згідно з прийнятим протоколом опису даних для ATPW. Далі вхідні дані приводяться до формату, необхідного для обробки.

Висновки

В роботі представлений метод обробки інформації про стан довкілля на основі даних, отриманих від дачачів, що під'єднані до сервіс-орієнтованої мережі на базі технології LoRaWAN. Метод реалізований в інформаційно-телекомунікаційній системі «Платформа великих даних» шляхом створення сервісу представлення аналітики щодо екологічного стану в місті та відображення у модулі «Інформаційні панелі» підсистеми бізнес-аналітики у вигляді дашбордів. Сутність методу складає створення інформаційної згортки, де відбувається вичленування інформації за рівнями в залежності від запиту кінцевого користувача. Отримана згортка не зберігається, оскільки первинна інформація залишається в базі даних системи і може бути використана за наступними запитами для аналітики чи порівняння.

Зазначене може бути використане в системах, що працюють з великими даними, з метою контролю поточного стану обробки інформації, створення вибірок для проміжних розрахунків, статистичних досліджень та узагальнень стану процесів, дія яких не завершена.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Musa S. (2018). Smart Cities-A Road Map for Development. IEEE Potentials. 37 (2): 19–23. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2016.2566099>
2. Gerhart J. Home Automation & Wiring. McGraw-Hill/TAB Electronics, 1999. P. 322. ISBN 978-0-07-024674-4.
3. Acharjya, D.P.; Geetha, M.K., eds. (2017). Internet of Things: Novel Advances and Envisioned Applications. Springer. p. 311. ISBN 9783319534725.
4. Bell M. (2010). SOA Modeling Patterns for Service-Oriented Discovery and Analysis. Wiley & Sons. p. 390. ISBN 978-0-470-48197-4.
5. Davidson J. D.; Coward D. (1999). Java Servlet Specification ("Specification") Version: 2.2 Final Release. Sun Microsystems. pp. 43–46.
6. Thomas J.; Traukina A. (2018). Industrial Internet Application Development: Simplify IIoT development using the elasticity of Public Cloud and Native Cloud Services. Packt Publishing. p. 25. ISBN 978-1788298599.
7. Технології інтернету речей. Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. Для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», спеціалізація «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем» / Б. Ю. Жураковський, І. О. Зенів; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 12,5 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 271 с.
8. Stephenson, W. D. (2018). The Future Is Smart: how your company can capitalize on the Internet of Things - and win in a connected economy. HarperCollins Leadership. p. 250. ISBN 9780814439777.
9. Енергоефективність в муніципальному секторі. Навчальний посібник для посадових осіб місцевого самоврядування / А.Максимов, І.Вахович, Т.Гутніченко, П.Бабічева, Н.Вакуленко, Н.Ігольнікова, Т.Цифра, О.Молодід, О.Молодід, О.Беленкова, Ю.Ячменьова, Ю.Дорошук, А.Скрипник, А.Ваколук, В.Бойко, М.Сегедій, Д.Вахович / Асоціація міст України – К., ТОВ «ПІДПРИЄМСТВО «ВІ ЕН ЕЙ», 2015. –184 с.
10. Гойко А. Ф. Ефективність інвестування реконструкції і технічного переоснащення діючих підприємств / Гойко А. Ф // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин: зб. наук.праць. – К.: КДТУБА, 2009. – С. 64–74.
11. Енергетична стратегія України на період до 2030 року [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://eircenter.com/images/Strategiya.pdf>
12. Batty M.; et al. (2012). Smart Cities of the Future. European Physical Journal ST. 214: 481–518. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>
13. Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M., Low power wide area networks: an overview, IEEE Commun. Surv. Tutor. 19 (2) (2017) 855–873, <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
14. Kircher M.; Prashant J. (2002). Pooling Pattern. EuroPLoP. Germany. <http://www.kircher-schwanninger.de/michael/publications/Pooling.pdf>
15. Spellerberg, Ian F.; Fedor, Peter J. (2003). A tribute to Claude Shannon (1916–2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the 'Shannon–Wiener' Index. Global Ecology and Biogeography. 12 (3): 177–179. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00015.x>
16. Chakrabarti, C. G., Indranil C. Shannon entropy: axiomatic characterization and application. International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences 2005.17 (2005): 2847–2854. <https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0511171.pdf>

17. Pinker S.; Jackendoff R. (2005). The faculty of language: What's so special about it?. *Cognition*. 95 (2): 201–236. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.08.004>
18. Довгий С. О., Бідюк П. І., Трофимчук О. М., Савенков О. І. Методи прогнозування в системах підтримки прийняття рішень. – К.: Азимут-Україна. – 2011. – 608 с.
19. Hodges A. (2012). *Alan Turing: The Enigma* (The Centenary ed.). Princeton University Press. ISBN 978-0-691-15564-7.

Стаття надійшла до редакції 16.08.2023 і прийнята до друку після рецензування 17.11.2023

REFERENCES

1. Musa, S. (2018). Smart Cities-A Road Map for Development. *IEEE Potentials*, 37 (2), 19–23. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2016.2566099>
2. Gerhart, J. (1999). *Home Automation & Wiring*. McGraw-Hill/TAB Electronics. ISBN 978-0-07-024674-4.
3. Acharjya, D. P., & Geetha, M. K. (Eds.). (2017). *Internet of things: Novel advances and envisioned applications*. Springer International Publishing. ISBN 9783319534725.
4. Bell, M. (2010). *SOA Modeling Patterns for Service-Oriented Discovery and Analysis*. Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-48197-4.
5. Davidson, J. D., & Coward, D. (1999). *Java Servlet Specification ("Specification") Version: 2.2 Final Release*. Sun Microsystems. pp. 43–46.
6. Thomas, J., Traukina, A. (2018). *Industrial Internet Application Development: Simplify IIoT development using the elasticity of Public Cloud and Native Cloud Services*. Packt Publishing. ISBN 978-1788298599.
7. Zhurakovskiy, B. Yu., & Zeniv, I.O. (2021). *Tekhnolohii internetu rechei. Navchalnyi posibnyk*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho [in Ukrainian].
8. Stephenson, W. D. (2018). *The Future Is Smart: how your company can capitalize on the Internet of Things – and win in a connected economy*. HarperCollins Leadership.
9. Maksymov, A., Vakhovych, I., Hutnichenko, T., Babicheva, P., Vakulenko, N., Iholnikova, N. et al. (2015). *Enerhoefektyvnist v munitsypalnomy sektori. Navchalnyi posibnyk dlia posadovykh osib mistsevoho samovriaduvannia. Asotsiatsiia mist Ukrainy*. Kyiv: TOV «Pidpriumstvo «VI EN EI» [in Ukrainian].
10. Hoiko, A. F. (2009). *Efektyvnist investuvannia rekonstruktsii i tekhnichnoho pereosnashchennia diiuchykh pidpriumstv. Shliakhy pidvyschennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn: zb. nauk.prats, 64-74* [in Ukrainian].
11. *Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku*. Retrieved from <http://eircenter.com/images/Strategiya.pdf>
12. Batty, M. et al. (2012). Smart Cities of the Future. *European Physical Journal ST*, 214, 481–518. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>
13. Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: an overview. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 19 (2), 855–873, <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
14. Kircher, M., & Prashant, J. (2002). *Pooling Pattern*. EuroPLoP. Germany. <http://www.kircher-schwanninger.de/michael/publications/Pooling.pdf>
15. Spellerberg, Ian F., & Fedor, Peter J. (2003). A tribute to Claude Shannon (1916–2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the 'Shannon–Wiener' Index. *Global Ecology and Biogeography*, 12 (3), 177–179. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00015.x>
16. Chakrabarti, C. G., & Indranil, C. (2005). Shannon entropy: axiomatic characterization and application. *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, 2005.17: 2847-2854. <https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0511171.pdf>

17. Pinker, S., & Jackendoff, R. (2005). The faculty of language: What's so special about it?. *Cognition*, 95 (2), 201–236. doi:10.1016/j.cognition.2004.08.004
18. Dovhyi, S. O., Bidiuk, P. I., Trofymchuk, O. M., & Savenkov, O. I. (2011). *Metody prohnozuvannia v systemakh pidtrymky pryiniattia rishen*. Kyiv: Azymut-Ukraina [in Ukrainian].
19. Hodges, A. (2012). *Alan Turing: The Enigma (The Centenary ed.)*. Princeton University Press. ISBN 978-0-691-15564-7.

The article was received 16.08.2023 and was accepted after revision 17.11.2023

Трофимчук Олександр Миколайович

член-кореспондент Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, Директор Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274>

Іцкович Вікторія Євгенівна

доктор філософії, молодший науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1351-8178>