2. Jayarathna CP, Agdas D, Dawes L, Yigitcanlar T. Multi-Objective Optimization for Sustainable Supply Chain and Logistics: A Review. *Sustainability*. 2021; 13(24):13617. https://doi.org/10.3390/su132413617.
3. Gajewska T, Walczyk D. Development of Transport Management Software. *Sustainability*. 2023; 15(15):12083. https://doi.org/10.3390/su151512083.
4. Sarbast Moslem, Baris Tekin Tezel, Ayse Ovgu Kinay, Francesco Pilla, A hybrid approach based on magnitude-based fuzzy analytic hierarchy process for estimating sustainable urban transport solutions, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 137, Part A, 2024, 109112. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109112.
5. Yuanxing Yin, Huan Wang, Xiaojun Deng, Real-time logistics transport emission monitoring-Integrating artificial intelligence and internet of things, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 136, 2024, 104426. https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104426.

УДК 004.9
Ю.Б. Максим'як
(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

АРХІТЕКТУРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ОПОВІЩЕННЯ З ФУНКЦІЄЮ ОБМІНУ ДАНИМИ З СЕНСОРНИМИ МЕРЕЖАМИ ТА СИСТЕМАМИ РАННЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ЗАГРОЗ

Y.B. Maksymyak

ARCHITECTURE OF THE AUTOMATED CENTRALIZED NOTIFICATION SYSTEM WITH THE FUNCTION OF DATA EXCHANGE WITH SENSOR NETWORKS AND EARLY THREAT DETECTION SYSTEMS

Практика застосування на території України систем централізованого оповіщення протягом 2022–2025 рр. показала, що традиційні платформи для оповіщення без інтеграції з сенсорними мережами та аналізаторами не забезпечують належну швидкодію й точність [1]. Відсутність єдиного стандартизованого інтерфейсу між різнорідними давачами призводить до фрагментації даних і зниження достовірності сигналів. Тому, актуальною є задача створення архітектури системи оповіщення, яка дасть можливість об'єднувати дані з різних джерел. Розробка такої теоретично обґрунтованої архітектури взаємодії автоматизованої системи реагування з сенсорними мережами раннього виявлення забезпечить мінімальну затримку, високу стійкість і захист від навмисної фальсифікації даних.

На сьогодні розробленого комплексного рішення не існує. Часткові рішення для автоматизованого виявлення й реагування на загрози в цивільному оповіщенні лише почали впроваджуватися і не мають масового характеру. Наприклад, в [2] розглядається впровадження адаптивного шлюзу з вбудованою функцією довірчої оцінки даних, а також у застосування гібридних алгоритмів машинного навчання для визначення аномалій у реальному часі. Відомими є спроби інтегруватися з телеметричними платформами, які використовують сенсорні мережі, зокрема на базі протоколів LoRaWAN, LTE-M та NB-IoT. Це дозволяє забезпечити покриття розосереджених територій із мінімальними витратами енергії та ресурсів. У деяких пілотних системах з'явилися шлюзи, які виконують нормалізацію даних та додають криптографічний підпис (напр., Ed25519) до кожного пакета даних, що значно ускладнює підміну чи підробку даних. Окремі рішення пропонують підхід із

застосуванням каскадної перевірки достовірності та валідацією координат GPS-даних і часових міток з високоточною синхронізацією (GPS-OCXO) [1, 3].

В даній роботі пропонуються результати розробки моделі взаємодії між автоматизованою системою централізованого оповіщення з однієї сторони, та сенсорними мережами і системами раннього виявлення загроз з іншої. Підґрунтям даної моделі є мікросервісна парадигма з контуром Zero-Trust, де кожен сервіс має істинно мінімальні привілеї доступу (рис. 1). На нижньому рівні функціонують сенсорні мережі з каналами LoRa-WAN, LTE-M та SAT-IoT, що передають зашифровані пакети у форматі CBOR через MQTT-брокери. Середній рівень представлений адаптивним шлюзом, який виконує нормалізацію та семантичне збагачення потоків шляхом додавання маркерів часу GPS-OCXO і цифрового підпису Ed25519. Верхній рівень складається з брокера подій, бази даних Time-Series TSDB та сервісу оркестрації сценаріїв оповіщення. Аналіз достовірності даних здійснюється з використанням дерева рішень Random Forest та методу локальної щільності LOF, навчальних вибірок із 1,2 млн записів та метрик F1≈0,94.

Рис. 1. Модель архітектури автоматизованої системи централізованого оповіщення з функцією обміну даними з сенсорними мережами та системами раннього виявлення загроз на основі мікросервісної парадигми з контуром Zero-Trust

Запропонована в роботі архітектура автоматизованої системи реагування на загрози, що інтегрує сенсорні мережі та підсистеми раннього виявлення загроз, довела свою ефективність на практиці, зокрема шляхом скорочення часу сповіщення. Наявні в її складі адаптивний шлюз, каскадний детектор FDIA та AI-модуль маршрутизації забезпечують цілісність телеметрії й мінімізують хибні спрацьовування без розголошення чутливої технічної інформації.

Перспективи подальшої еволюції даної архітектури пов’язані з автоматизацією механізму дотриманням політик безпеки шляхом застосування смарт-контрактів, що дозволяє у режимі near-real-time коригувати правила фаєрволів та маршрутизаторів без участі оператора [5]. Також перспективним є впровадження алгоритмів колективного навчання federated learning, що дозволить обмінюватися знаннями між регіонами без передачі необроблених даних, з дотриманням принципів цифрового суверенітету.

Література

1. Zabolotnyi O., Kravchenko V. Digital Resilience Lessons from the Russian-Ukrainian Armed Conflict // Journal of Information Security. – 2023. – № 4. – P. 112–128. – Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1874548223000501. – Дата звернення: 14.05.2025.

2. Smith J., Alvarez L., Chen P. A Component-Based Approach to Early Warning Systems: A Theoretical Model // Applied Sciences. – 2025. – Т. 15, № 6. – Режим доступу: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/6/3218. – Дата звернення: 14.05.2025.
3. Lu X., Yang F. A Framework for Detecting False Data Injection Attacks in Large-Scale Wireless Sensor Networks // Sensors. – 2024. – Т. 24, № 5. – Режим доступу: https://www.mdpi.com/1424-8220/24/5/1643/pdf. – Дата звернення: 14.05.2025. (mdpi.com)
4. García-Crespo Á., López-Martín C. Smart Wireless Sensor Networks with Virtual Sensors for Forest-Fire Prediction // Electronics. – 2024. – Т. 14, № 2. – Режим доступу: https://www.mdpi.com/2079-9292/14/2/223. – Дата звернення: 14.05.2025.
5. Patel K., Roy S. Automated Cybersecurity Compliance and Threat Response Using AI & Blockchain Smart Contracts // Proceedings of the International Conference on Distributed Computing Systems. – 2024. – P. 77–85. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/384057732. – Дата звернення: 14.05.2025.

УДК 004.942

Л.Є. Мосій, А.С. Сверстюк, докт. техн. наук, проф.
Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя, Україна
Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського, Україна

ПІДХІД ДО РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЕКСПЕРТНОГО АНАЛІЗУ МОРФОЛОГІЧНИХ ОЗНАК КАРДІОСИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНОЇ ФУНКЦІЇ АМПЛІТУДНОЇ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ

L. Mosiy, A. Sverstiuk, Dr., Prof.

APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR EXPERT ANALYSIS OF MORPHOLOGICAL FEATURES OF CARDIAC SIGNALS BASED ON FUNCTION OF AMPLITUDE VARIABILITY

Сучасна кардіодіагностика потребує інтегрованих інформаційних технологій, побудованих на основі високоточних математичних моделей та методів обробки електрокардіосигналів (ЕКС), які б дозволяли виявляти та диференціювати патологічні стани серцево-судинної системи (ССС). Існуючі інформаційні технології аналізу ЕКС переважно зосереджуються на часових характеристиках або повній морфології сигналу, проте недостатньо уваги приділяється систематичному аналізу динаміки амплітудних значень характеристичних зубців, які містять критично важливу діагностичну інформацію.

Для обробки ЕКС можна застосовувати різні методи математичного моделювання. Українські дослідники [1] створили методику комп'ютерного моделювання циклічних сигналів на основі циклічних випадкових процесів із застосуванням статистичних оцінок та дискретних функцій ритму. Також автор [2] запропонував ритмо-адаптивні розклади рядів Фур'є для циклічних числових функцій та імовірнісних характеристик циклічних випадкових процесів, які демонструють кращу ефективність порівняно з традиційними методами Фур'є. Особливу увагу дослідників привертають методики імітаційного моделювання полікомпонентних синхронних кардіосигналів із використанням векторного представлення циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів, що має безпосереднє застосування у розв'язанні прикладних задач кардіодіагностики [3]. У роботі [4] представлено модель на основі циклічного дискретного випадкового процесу з інтегрованою функцією часового ритму, що враховує амплітудні характеристики характеристичних зубців ЕКС (P, Q, R, S, T). Запропонована модель дозволяє адекватно відтворити фундаментальну циклічну природу ЕКС із одночасним урахуванням їх стохастичної варіативності та флуктуацій амплітудних параметрів кардіоциклів.

Для моделювання амплітудної варіабельності зубців ЕКС введено множину $\boldsymbol{I} = \{P, Q, R, S, T\}$, що представляє типи характеристичних зубців сигналу. Для кожного типу зубців $k \in$