

Лисенко Микола Миколайович*Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ*

ORCID 0009-0000-3734-8332

Козлов Дмитро Євгенович*Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ*

ORCID 0009-0007-1454-9036

АІОТ-СИСТЕМА НА БАЗІ ТЕОРІЇ ГРАФІВ ДЛЯ МЕДИЧНОЇ СФЕРИ

Анотація. У роботі представлено математичну модель застосування теорії графів у системах АІОТ (Artificial Intelligence of Things) для моніторингу стану здоров'я пацієнтів. Модель враховує структуру сенсорної мережі, динаміку фізіологічних параметрів у часі, а також інтеграцію інтелектуальних методів обробки даних на основі графових нейронних мереж. IoT-пристрої (сенсори серцевого ритму, глюкози, рівня кисню, руху тощо) моделюються у вигляді вузлів орієнтованого зваженого графа, в якому ваги ребер відображають силу взаємозв'язків між показниками або характеристики комунікаційних каналів. Побудована модель включає матрицю суміжності, векторні представлення параметрів сенсорів, та реалізацію прогнозування станів за допомогою GCN та Temporal GNN-архітектур. Особливу увагу приділено алгоритмам виявлення аномалій, які базуються на оцінці відхилень між фактичними та прогнозованими значеннями фізіологічних параметрів. Запропоновано математичні підходи до порогової інтерпретації таких відхилень, що дає змогу оперативно виявляти загрози здоров'ю. Розглянуто можливість адаптивного навчання структури графа на основі вхідних даних, що дозволяє системі динамічно оптимізувати внутрішні залежності між сенсорами. Результати дослідження можуть бути застосовані при створенні інтелектуальних систем медичного моніторингу у клінічних умовах, у віддаленому догляді за пацієнтами, а також у мобільних рішеннях для профілактики хронічних захворювань. Запропонована модель є основою для подальшого розвитку адаптивних, персоналізованих АІОТ-платформ в охороні здоров'я, здатних до самонавчання, прогнозування і прийняття рішень у реальному часі.

Ключові слова: Інтернет речей, архітектура, оптимізація, автоматизація, сенсор, моделювання, інформаційна система, мережа, теорія графів, штучний інтелект.

Lysenko Mykola*State university of information and communication technologies, Kyiv*

ORCID 0009-0000-3734-8332

Kozlov Dmytro*State university of information and communication technologies, Kyiv*

ORCID 0009-0007-1454-9036

AIOT SYSTEM BASED ON GRAPH THEORY FOR THE MEDICAL FIELD

Abstract: This study presents a comprehensive mathematical model for applying graph theory in AIoT (Artificial Intelligence of Things) systems designed for health monitoring. The model accounts for the structure of the sensor network, the temporal dynamics of physiological parameters, and the integration of intelligent data processing methods based on graph neural networks. IoT devices (such as heart rate monitors, glucose sensors, oxygen level detectors, and motion sensors) are modeled as nodes in a directed weighted graph, where edge weights represent the strength of interdependencies between parameters or the characteristics of communication

channels. The developed model includes an adjacency matrix, vector representations of sensor parameters, and forecasting mechanisms using GCN and Temporal GNN architectures. Special attention is given to anomaly detection algorithms based on deviations between actual and predicted values of physiological signals. Mathematical approaches to threshold interpretation of these deviations are proposed, allowing timely identification of potential health threats. The study also considers dynamic optimization of graph structure through adaptive learning from input data, enabling the system to refine inter-sensor dependencies in real time. The findings of this research can be applied in the development of intelligent health monitoring systems for clinical settings, remote patient care, and mobile health solutions aimed at chronic disease prevention. The proposed model forms a foundation for the advancement of adaptive, personalized AIoT platforms in healthcare, capable of self-learning, forecasting, and real-time decision-making.

Keywords: Internet of Things, architecture, optimisation, automation, sensor, modelling, information system, network, graph theory, artificial intelligence.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку цифрових технологій охорона здоров'я активно інтегрує рішення на базі Інтернету речей (IoT), що забезпечують безперервний моніторинг фізіологічних показників пацієнтів. Поєднання IoT з інструментами штучного інтелекту (AI) утворює новий напрям — AIoT (Artificial Intelligence of Things), який дозволяє не лише збирати великі обсяги даних, а й інтелектуально аналізувати їх у реальному часі. Такий підхід має надзвичайно важливе значення для раннього виявлення патологій, оцінки ризиків і прийняття рішень у сфері медичного догляду. Актуальність дослідження зумовлена потребою у створенні адаптивних, масштабованих та надійних моделей, здатних точно відображати структуру та поведінку таких систем [1].

Одним із потужних математичних інструментів для опису взаємозв'язків у складних системах є теорія графів. Вона дозволяє формалізувати структуру IoT-мережі у вигляді сукупності вузлів (сенсорів) та зв'язків між ними, що дає змогу досліджувати як топологію системи, так і потоки інформації. Зокрема, орієнтовані зважені графи дозволяють враховувати напрям і силу взаємодій між пристроями, а також моделювати залежності між медичними показниками. Застосування графових моделей є доцільним при аналізі мультисенсорних систем, де значення одного параметра може впливати на інші — наприклад, зміна частоти серцевих скорочень при зниженні рівня кисню в крові [2].

Використання IoT-технологій у медицині стрімко розширюється: від фітнес-браслетів і кардіотрекерів до складних багатоканальних систем моніторингу в реанімаційних відділеннях. Проте самостійна обробка таких потоків даних є обмеженою без інтелектуального компоненту. Тому виникає потреба у побудові таких моделей, які б не лише описували структуру IoT-системи, а й здійснювали прогнозування стану пацієнта на основі історичних даних. Саме тут вступає в дію штучний інтелект, зокрема графові нейронні мережі, які навчаються на структурі графа та значеннях сенсорних даних [5].

У цьому дослідженні запропоновано комплексну математичну модель AIoT-системи охорони здоров'я, яка базується на поєднанні класичної теорії графів із сучасними методами машинного навчання. Модель описує як топологію IoT-мережі, так і часову динаміку даних, та дозволяє виявляти аномальні стани пацієнтів шляхом аналізу взаємозв'язків між сенсорами. Такий підхід відкриває нові можливості для побудови адаптивних, надійних і масштабованих систем персоналізованої медицини, здатних працювати як у стаціонарних закладах, так і в умовах віддаленого моніторингу.

Мета і задачі дослідження.

Метою даного дослідження є розробка повноцінної математичної моделі графа для AIoT-системи охорони здоров'я, яка б дозволяла ефективно моделювати структуру сенсорної мережі, динаміку медичних показників та здійснювати інтелектуальне прогнозування і виявлення

аномалій у фізіологічних даних пацієнтів. Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі задачі: побудувати формальне представлення АІоТ-системи у вигляді орієнтованого зваженого графа; описати математичну модель сенсорних даних як векторів станів у часі; інтегрувати методи графових нейронних мереж для прогнозування та аналізу даних; розробити підхід до виявлення аномалій на основі порівняння фактичних і прогнозованих значень; а також передбачити можливість динамічного навчання структури графа залежно від змін у даних середовища.

Результати дослідження.

Давайте розглянемо повноцінну математичну модель графа для АІоТ-системи охорони здоров'я, яка враховує:

структуру сенсорної мережі,

динаміку даних у часі,

АІ-компонент у вигляді графової нейронної мережі (GNN),

виявлення аномалій на основі прогнозування.

1. Формалізація графа системи

Нехай маємо орієнтовний зважений граф:

$$G = (V, E, W)$$

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – вузли (ІоТ-пристрої, сенсори)

$E \subseteq V \times V$ – орієнтовні ребра.

$W = \{w_{ij} \in \mathbb{R}^+ | (v_i, v_j) \in E\}$ – ваги ребер (наприклад, сила взаємозв'язку, надійність або частота передачі).

$A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матриця сумісності графа:

$$A_{ij} = \begin{cases} w_{ij}, & \text{якщо } (v_i, v_j) \in E, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}$$

2. Стани сенсорів.

Нехай $X(t) \in \mathbb{R}^{n \times d}$ – матриця станів усіх пристроїв у момент часу t , де:

d – кількість параметрів на сенсор (наприклад, пульс, температура, рівень глюкози, SpO2 тощо),

$X_i(t) \in \mathbb{R}^d$ – вектор даних з вузла v_i .

3. Графова нейронна мережа.

Графова модель для прогнозування майбутніх станів побудована на основі Graph Convolutional Network (GCN)

$$H^{(l+1)} = \sigma(\tilde{D}^{-\frac{1}{2}} \tilde{A} \tilde{D}^{-\frac{1}{2}} H^{(l)} W^{(l)})$$

Де $\tilde{A} = A + I$ – матриця суміжності з самозв'язками,

$\tilde{D}$ – діагональна матриця ступенів: $\tilde{D}_{ii} = \sum_j \tilde{A}_{ij}$,

$H^{(0)} = X(t)$ – початкові дані (вхід),

$H^{(l)} = \tilde{X}(t+1)$ – прогнозовані стани сенсорів,

$W^{(l)}$ – ваги нейронної мережі на l -му шарі,

σ – активаційна функція (ReLU, tanh тощо).

4. Модель прогнозування з часовим компонентом

У системах АІоТ для охорони здоров'я важливо не лише оцінювати поточний стан сенсорів, але й передбачати майбутні зміни фізіологічних параметрів пацієнта на основі їх часової

динаміки. Для цього використовується модель прогнозування з часовим компонентом, яка поєднує графову структуру IoT-пристроїв із механізмами обробки часових рядів.

Щоб врахувати часовий аспект, до класичної GCN інтегрується рекурентна або послідовна модель, наприклад GRU (Gated Recurrent Unit), LSTM (Long Short-Term Memory) або Temporal GCN (T-GCN). Це дозволяє враховувати не лише просторову кореляцію між сенсорами, але й часову залежність у серії вимірювань. Така модель описується рекурсивно:

$$H^{(l+1)} = GRU(GNN(X(t)), H^{(t)})$$

або

$$\hat{X}(t+1) = T - GCN(X(t), A)$$

де $H^{(t)}$ — прихований стан нейронної мережі, що містить інформацію про попередні вимірювання;

$GNN(X(t))$ — просторове згортання (graph convolution), що формує представлення даних у контексті графа;

GRU — механізм обробки часових залежностей, який навчається виявляти важливі патерни змін показників у часі.

Це дозволяє враховувати не лише поточний стан, а й динаміку попередніх моментів часу.

5. Виявлення аномалій

Одним із ключових завдань АІоТ-системи в медицині є оперативне виявлення аномалій — раптових або поступових відхилень у фізіологічних показниках, що можуть свідчити про загрозу здоров'ю пацієнта. Для цього в запропонованій моделі використовується підхід, заснований на порівнянні прогнозованих і фактичних значень сенсорних даних.

Після застосування графової нейронної мережі система генерує прогнозований вектор стану для кожного сенсора $\hat{X}_i(t+1)$. Отриманий прогноз порівнюється з реальними даними $X_i(t+1)$, які надходять у наступний момент часу. Розраховується вектор відхилення:

$$\epsilon_i(t+1) = \|\hat{X}_i(t+1) - X_i(t+1)\|_2$$

Це значення показує, наскільки передбачене значення відрізняється від фактичного, і виступає як індикатор потенційної аномалії:

$$\alpha_i(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \epsilon_i(t+1) > \delta_i, \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

де δ_i — порогове значення для сенсора v_i , яке може бути фіксованим (заданим лікарем або системою) або динамічним — адаптуватися до середнього та стандартного відхилення даних сенсора.

Цей підхід дозволяє не лише виявляти аномалії в конкретних точках системи, а й відстежувати каскадні ефекти між сенсорами на основі графової структури.

Модель може навчатись не лише на фіксованому графі A , а й оптимізувати структуру зв'язків:

$$A = \text{Learnable}(X) \Rightarrow \text{Dynamic GNN}$$

Тобто система автоматично визначає, які пристрої найбільше впливають один на одного на основі даних.

Ця повноцінна модель підходить для реалізації в системах:

- хмарного моніторингу пацієнтів,
- автономного догляду (наприклад, у будинку для літніх людей),
- мобільних додатків для раннього попередження про ризики.

Висновок.

Застосування повноцінної математичної моделі графа в AIoT-системах охорони здоров'я дозволяє точно й структуровано описувати як топологію мережі сенсорів, так і динаміку зміни фізіологічних параметрів у часі. Використання графових нейронних мереж (GNN) у поєднанні з часовими моделями (наприклад, GRU або T-GCN) дає змогу здійснювати інтелектуальний аналіз даних, прогнозування стану пацієнтів та виявлення аномалій у реальному часі. Такий підхід відкриває нові можливості для створення адаптивних, самонавчальних медичних IoT-систем, здатних підвищити якість моніторингу, своєчасність втручання та персоналізацію догляду за пацієнтами.

Список використаної літератури

1. C. Vandelandotte, A.M. Müller, C.E. Short, M. Hingle, N. Nathan, S.L. Williams, et al. Past, present, and future of eHealth and mHealth research to improve physical activity and dietary behaviors. *Journal of Nutrition Education and Behavior*, 48 (3) (2016), 10.1016/j.jneb.2015.12.006
2. P. Castillejo, J.F. Martinez, J. Rodriguez-Molina, A. Cuerva Integration of wearable devices in a wireless sensor network for an E-health application. *IEEE Wireless Communications*, 20 (4) (2013), pp. 38-49, 10.1109/MWC.2013.6590049
3. Frederic Ehrler, C.L. 2024 Supporting elderly homecare with smartwatches: Advantages and drawbacks. In Vol. Volume 205: E-Health – For Continuity of Care. *Studies in Health Technology and Informatics* (pp. 667–671). doi:10.3233/978-1-61499-432-9-667.
4. Алексіна, Л. Т., А. П. Бондарчук. "Оптимізація гіперпараметрів для машинного навчання." *Зв'язок 2* (2024): 18-22.
5. Пантелєєв, В., Білодід, В., & Радівілова, Т. (2024). Інтеграція алгоритмів машинного навчання та аналізу графів для підвищення ефективності прогнозування внутрішніх інцидентів через соціальні мережі. *Матеріали конференцій МЦНД*, (21.06. 2024; Полтава, Україна), 128-130.
6. Довженко, Т. П., А. П. Бондарчук. "Аналіз сучасного етапу розвитку штучного інтелекту в телекомунікаціях." *Зв'язок 1* (2025): 43-48.
7. Чичкар'ов, Євген, et al. "Метод вибору ознак для системи виявлення вторгнень з використанням ансамблевого підходу та нечіткої логіки." *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»* 1.21 (2023): 234-251.
8. Бобрицька, Г. С. "Прикладне застосування теорії графів у різних сферах життя суспільства та окремої особистості." *Фізико-математична освіта* 3 (13) (2017): 26-30.
9. Zhebka, V., Skladannyi, P., Bazak, Y., Bondarchuk, A., & Storchak, K. (2024). Methods for Predicting Failures in a Smart Home. In *Digital Economy Concepts and Technologies Workshop 2024* (Vol. 3665, pp. 70-78).