

УДК 004.9  
DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.3.6>

**Іван ШЕВЦОВ**

аспірант кафедри електронних обчислювальних машин (ЕОМ), факультет комп'ютерної інженерії та управління, Харківський національний університет радіоелектроніки, [ivan.shevtsov@nure.ua](mailto:ivan.shevtsov@nure.ua)  
ORCID: 0000-0003-0597-1589

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ EDGE COMPUTING ТА FOG COMPUTING У СИСТЕМАХ МЕДИЧНОГО МОНІТОРИНГУ

**Анотація.** Дана стаття присвячена порівняльному аналізу ефективності технологій Edge Computing та Fog Computing в системах медичного моніторингу.

**Метою** дослідження є вивчення переваг і недоліків кожної з технологій з метою визначення найбільш оптимального підходу для забезпечення стабільної та ефективної роботи систем медичного моніторингу.

**Методологія** дослідження включала аналіз наукових публікацій, оцінку архітектурних особливостей, швидкості обробки даних, стійкості до відмов, масштабованості та енергоспоживання технологій Edge та Fog Computing. Для досягнення цієї мети використовувалися методи системного аналізу, моделювання навантаження та інтеграційного аналізу для оцінки продуктивності та доцільності впровадження обраних технологій у медичних системах.

**Наукова новизна** роботи полягає у розробці методології для вибору оптимальної технології на основі специфічних вимог до продуктивності, надійності та енергозбереження в умовах реального часу.

**Результати дослідження** показали, що технологія Edge Computing забезпечує мінімальні затримки та високу швидкість реакції на зміну стану пацієнтів, що є критичним у реанімаційних відділеннях. Водночас, Fog Computing забезпечує більш гнучке масштабування і високу стійкість до відмов, що робить її ефективною для великих мереж або віддалених об'єктів, де необхідно обробляти великі обсяги даних.

**Висновки** підкреслюють, що вибір між цими технологіями залежить від специфіки завдань медичної інфраструктури: Edge Computing є оптимальним для швидкої локальної обробки, тоді як Fog Computing підходить для розподілених систем з високими вимогами до надійності та безпеки. Рекомендовано комбіноване використання обох технологій для створення гнучкої та адаптивної медичної інфраструктури.

**Ключові слова:** обробка даних, розподілені системи, затримка сигналу, обробка в реальному часі, хмарні технології.

## Ivan SHEVTSOV. THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF EDGE COMPUTING AND FOG COMPUTING IN MEDICAL MONITORING SYSTEMS

**Abstract.** This article is dedicated to a comparative analysis of the effectiveness of Edge Computing and Fog Computing technologies in medical monitoring systems.

**The aim** of the study is to examine the advantages and disadvantages of each technology to determine the most optimal approach for ensuring stable and efficient operation of medical monitoring systems.

**The methodology** of the research involved analyzing scientific publications, evaluating architectural features, data processing speed, fault tolerance, scalability, and energy consumption of Edge and Fog Computing technologies. To achieve this aim, methods of systems analysis, load modeling, and integration analysis were used to assess the performance and feasibility of implementing the selected technologies in medical systems.

**The scientific novelty** of the work lies in developing a methodology for selecting the optimal technology based on specific requirements for performance, reliability, and energy efficiency in real-time conditions. The results of the study showed that Edge Computing technology provides minimal latency and high-speed response to changes in patient conditions, which is critical in intensive care units. Meanwhile, Fog Computing offers more flexible scalability and high fault tolerance, making it effective for large networks or remote sites where large volumes of data need to be processed.

**The conclusions** emphasize that the choice between these technologies depends on the specific tasks of the medical infrastructure: Edge Computing is optimal for rapid local processing, while Fog Computing is more suitable for distributed systems with high demands for reliability and security. A combined use of both technologies is recommended to create a flexible and adaptive medical infrastructure.

**Key words:** data processing, distributed systems, signal latency, real-time processing, cloud technologies.

**Вступ. Постановка проблеми.** З огляду на зростаючі вимоги до ефективності та надійності обробки даних у системах медичного моніторингу, актуальним є питання вибору відповідної технології для їх реалізації. Існують два основних підходи, що пропонують різні рівні розподілу обчислювальних ресурсів: Edge Computing та Fog Computing. Вирішення науково-технічної проблеми полягає в оптимізації процесу обробки даних, що включає мінімізацію затримок, підвищення надійності та забезпечення високої масштабованості систем. Окрім цього, важливою є задача зниження енергоспоживання, що набуває критичного значення в умовах обмежених ресурсів.

Науково-технічна проблема полягає в необхідності визначення найбільш ефективної технології з точки зору її адаптивності до різних технічних умов та середовищ, забезпечення стабільної роботи систем в умовах реального часу та максимального використання ресурсів інфраструктури. Порівняльний

аналіз Edge Computing та Fog Computing дозволить оцінити їхні можливості та обмеження, спрямовуючи увагу на такі параметри, як продуктивність, стійкість до відмов, енергоефективність та гнучкість впровадження в різні технічні середовища.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз останніх досліджень, присвячених порівнянню ефективності edge computing та fog computing у системах медичного моніторингу, демонструє різні підходи до оптимізації обробки даних, підвищення продуктивності та безпеки. Ці дослідження висвітлюють важливість вибору відповідної технології залежно від специфічних вимог медичних додатків.

Hartmann M., Hashmi U.S., та Imran A. [7] аналізують переваги edge computing для систем охорони здоров'я, підкреслюючи можливість локальної обробки даних та зменшення затримок, що є критичним у медичному моніторингу. Це підтверджується і в дослідженні Ray P.P., Dash D., та De D. [15], які розглядають ефективність edge computing для медичних додатків IoT, звертаючи увагу на підвищення швидкості обробки даних та зменшення залежності від центральних серверів. З іншого боку, Laroui M. та співавт. [9] та Mutlag A.A. і його колеги [12] акцентують увагу на перевагах fog computing для IoT-систем у сфері охорони здоров'я. Вони обґрунтовують, що fog computing дозволяє ефективніше розподіляти обчислювальні завдання між різними рівнями інфраструктури, забезпечуючи зниження затримок і покращення управління ресурсами. Подібні висновки наведені в дослідженні Muneeb M., Ko K.-M., та Park Y.-H. [11], які пропонують багатошарову архітектуру fog computing для обчислювально-інтенсивних IoT-додатків, що також підвищує надійність та ефективність медичних систем.

У свою чергу, дослідження Prasad V.K., Bhavsar M.D., та Tanwar S. [13] розглядає вплив моніторингу та управління ресурсами у гібридних системах, що поєднують fog та edge computing, на продуктивність медичних додатків. Shakarami A. та ін. [17] представляють систематичний огляд ресурсного забезпечення в edge і fog обчисленнях, акцентуючи на підходах до оптимізації ресурсів, що є ключовим для забезпечення стабільної роботи медичних IoT-додатків.

Безпека та конфіденційність є важливими аспектами у fog та edge обчисленнях, особливо у медичних додатках. Alwakeel A.M. [3] робить огляд основних проблем безпеки та конфіденційності, пов'язаних з цими технологіями, пропонуючи методи нейтралізації потенційних загроз. Подібні питання розглядають Seljakanmani S. та Sumathi M. [16], аналізуючи використання нечіткої логіки в поєднанні з fog та cloud computing для покращення продуктивності систем моніторингу здоров'я.

У дослідженні Dash S. та співавт. [5] йдеться про важливість інтеграції edge та fog computing у медичних системах для забезпечення ефективного моніторингу та реагування. Подібний акцент на інноваційні технології зроблено у Kumar V. та ін. [8], які порівнюють можливості fog і cloud computing, підкреслюючи значення fog computing для зменшення затримок у медичних додатках. Додане джерело розширює аналіз щодо використання технологій обробки даних у контексті прийняття рішень. Нестеров В. [1] досліджує вплив методів візуалізації даних на процеси прийняття бізнес-рішень, підкреслюючи важливість інтеграції edge та fog computing для покращення точності та швидкості аналізу інформації в медичних системах. Це дослідження є значущим для розуміння того, як ефективно поєднувати обчислювальні ресурси для підтримки процесів прийняття рішень в умовах динамічних та великих даних.

Загалом, дослідження демонструють, що як fog, так і edge computing мають свої переваги для медичного моніторингу, однак їх застосування залежить від конкретних умов використання. Вибір між цими технологіями повинен базуватися на вимогах до швидкості обробки даних, безпеки, управління ресурсами та доступності мережевої інфраструктури, що підтверджується висновками всіх згаданих дослідників.

Подальшого вивчення потребують питання аналізу ключових принципів та архітектурних особливостей технологій Edge Computing і Fog Computing у контексті їхнього використання в системах медичного моніторингу; вивчення реальних прикладів застосування технологій Edge Computing і Fog Computing для оцінки їхньої ефективності з точки зору затримок, надійності, масштабованості та енергоспоживання; розробки методології для вибору найбільш підходящої технології на основі аналізу вимог до продуктивності, надійності та енергозбереження в системах медичного моніторингу.

**Мета статті** полягає у проведенні порівняльного аналізу ефективності технологій Edge Computing та Fog Computing у контексті їх застосування в системах медичного моніторингу, з метою визначення найбільш оптимального підходу для забезпечення стабільної та ефективної роботи цих систем.

Основні завдання статті включають:

1. Проведення аналізу ключових принципів та архітектурних особливостей технологій Edge Computing і Fog Computing у контексті їхнього використання в системах медичного моніторингу.

2. Вивчення реальних прикладів застосування технологій Edge Computing і Fog Computing для оцінки їхньої ефективності з точки зору затримок, надійності, масштабованості та енергоспоживання.

3. Визначення ситуацій і умов, у яких кожна з технологій демонструє максимальну ефективність, з урахуванням специфіки медичних інфраструктур.

4. Розробка методології для вибору найбільш підходящої технології на основі аналізу вимог до продуктивності, надійності та енергозбереження в системах медичного моніторингу.

5. Формулювання рекомендацій щодо оптимального впровадження Edge Computing або Fog Computing у системи медичного моніторингу, з урахуванням сучасних технічних викликів і ресурсних обмежень.

**Виклад основного матеріалу.** Технології обробки даних у сучасних медичних системах моніторингу відіграють критичну роль у забезпеченні оперативної та надійної реакції на зміни в стані здоров'я пацієнтів. Зі зростанням обсягу медичних даних і необхідністю їхньої обробки в режимі реального часу важливо обирати ефективні підходи до розподілу обчислювальних ресурсів. Edge Computing і Fog Computing є двома ключовими технологіями, які пропонують різні стратегії для вирішення цієї проблеми.

Edge Computing орієнтований на локальну обробку даних безпосередньо на пристроях, що генерують ці дані, тоді як Fog Computing розширює обчислення на проміжні вузли, наближаючи їх до джерел даних, але все ж залишаючи можливість використання централізованих хмарних ресурсів. Порівняльна характеристика технологій Edge Computing і Fog Computing у системах медичного моніторингу представлена в табл. 1.

Таблиця 1

**Порівняльна характеристика технологій Edge Computing і Fog Computing у системах медичного моніторингу**

Параметр	Edge Computing	Fog Computing
Рівень обробки даних	Локальний, на рівні кінцевих пристроїв	Розподілений, між кінцевими пристроями та проміжними вузлами
Швидкість обробки	Висока, мінімальні затримки	Помірна, залежить від рівня розподілу обчислень
Вплив на інфраструктуру	Знижене навантаження на центральні сервери	Оптимізоване використання мережевих ресурсів
Стійкість до відмов	Обмежена, залежить від надійності локальних пристроїв	Вища, завдяки багаторівневій архітектурі та резервуванню ресурсів
Масштабованість	Обмежена кількістю та потужністю периферійних пристроїв	Висока, завдяки інтеграції з хмарними та проміжними обчисленнями
Енергоспоживання	Низьке, зосереджене на окремих задачах	Вища, через участь проміжних вузлів
Вартість впровадження	Низька, але може зростати з ускладненням мережі	Вища, враховуючи необхідність налаштування проміжних і хмарних ресурсів

*Джерело: сформовано автором на підставі [7; 9; 17]*

Edge Computing та Fog Computing мають принципові відмінності у підходах до розподілу обчислювальних ресурсів і обробки даних у системах медичного моніторингу. У випадку Edge Computing обробка даних здійснюється на локальному рівні, безпосередньо на пристроях, які збирають ці дані. Це дозволяє знизити затримки та підвищити швидкість реакції системи, що є критичним для медичних застосувань, де час є вирішальним фактором.

Однак така архітектура може обмежуватися надійністю локальних пристроїв і складністю масштабування системи. Fog Computing, у свою чергу, розширює обчислювальні можливості шляхом використання проміжних вузлів, які дозволяють ефективно розподіляти обчислення між периферією та хмарою. Це забезпечує кращу стійкість до відмов і гнучкість у масштабуванні, але вимагає більшого енергоспоживання і може призводити до підвищення вартості впровадження. Застосування цих технологій у сучасних умовах залежить від конкретних потреб медичної інфраструктури. Edge Computing найбільш ефективний у ситуаціях, де необхідна максимальна швидкість обробки даних з мінімальною затримкою, наприклад, у реанімаційних відділеннях. Fog Computing підходить для більш складних мереж, де важливе рівномірне розподілення обчислювальних задач і забезпечення надійної роботи систем у випадку великих обсягів даних або віддалених об'єктів. Показники ефективності технологій Edge Computing і Fog Computing у сучасних медичних системах моніторингу представлено в табл. 2.

Таблиця 2

**Показники ефективності технологій Edge Computing і Fog Computing  
у сучасних медичних системах моніторингу**

Показник ефективності	Edge Computing	Fog Computing
Час реагування на події	< 1 мс	1-10 мс
Навантаження на мережу	Мінімальне	Середнє
Витрати на технічне обслуговування	Низькі	Помірні
Гнучкість адаптації	Низька	Висока
Інтеграція з хмарними технологіями	Мінімальна	Висока
Стійкість до мережевих відмов	Обмежена	Висока
Продуктивність у розподілених системах	Обмежена	Висока

*Джерело: сформовано автором на підставі [2, 6, 10, 11]*

Як видно з таблиці, Edge Computing забезпечує надзвичайно швидкий час реагування на події, що є ключовим показником для медичних застосувань, де кожна секунда може мати вирішальне значення. Однак ця технологія обмежена у своїй здатності до масштабування та адаптації, що може бути критичним у великих або складних медичних мережах. Fog Computing, натомість, забезпечує гнучкість у масштабуванні і стійкість до мережевих відмов, що робить її привабливою для застосування в складних інфраструктурах, де важлива надійність і стабільність роботи. При цьому ця технологія має середній рівень мережевого навантаження та потребує більших витрат на технічне обслуговування через складність налаштування та підтримки проміжних вузлів і інтеграції з хмарними сервісами.

У сучасних умовах вибір між Edge Computing та Fog Computing залежить від специфіки медичних завдань і технічних вимог. Edge Computing є кращим вибором для ситуацій, де важлива оперативність і мінімальні затримки, тоді як Fog Computing підходить для більш масштабних і розподілених систем, що потребують високої надійності та гнучкості в управлінні обчислювальними ресурсами.

Технології Edge Computing і Fog Computing відіграють важливу роль у сучасних системах медичного моніторингу, особливо в умовах, коли необхідно забезпечити високу швидкість обробки даних і мінімізувати затримки. Edge Computing дозволяє виконувати обробку даних безпосередньо на пристроях, які знаходяться біля пацієнта, що значно підвищує ефективність реагування на критичні зміни в стані здоров'я. Fog Computing, у свою чергу, забезпечує проміжну обробку на рівні локальних серверів (Fog Nodes), перш ніж дані надходять до центральної хмари. Це дозволяє зменшити навантаження на центральні сервери та покращити масштабованість системи, особливо в умовах великого обсягу даних. Приклади застосування технологій Edge Computing і Fog Computing у системах медичного моніторингу представлено в табл. 3.

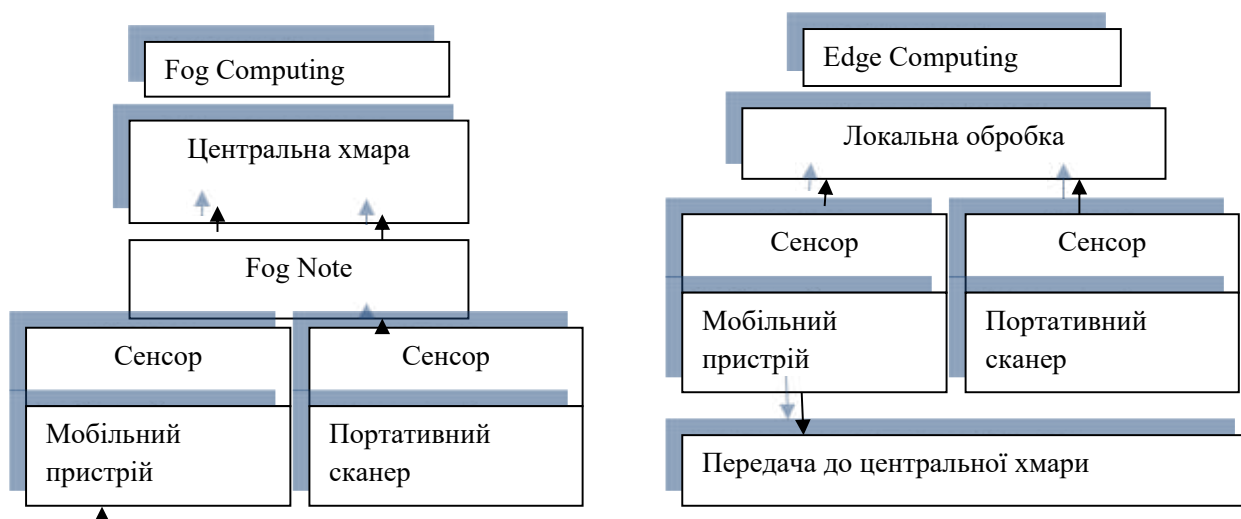
Таблиця 3

**Застосування технологій Edge Computing і Fog Computing у системах медичного моніторингу**

Сценарій використання	Edge Computing	Fog Computing
Моніторинг пацієнтів у віддалених районах	Використання мобільних пристроїв для збору та обробки даних на місці	Обробка даних на місцевих серверах з передачею до центральної бази
Обробка зображень для діагностики	Аналіз зображень на периферійних пристроях, таких як портативні сканери	Попередня обробка на Fog Nodes перед передачею до хмарних систем для глибокого аналізу
Безперервний моніторинг життєвих показників	Миттєва реакція на зміни стану пацієнта завдяки локальній обробці	Розподілена обробка і зберігання даних для довготривалого моніторингу

*Джерело: сформовано автором на підставі [3, 13, 11, 16, 18]*

Зокрема, для моніторингу пацієнтів у віддалених районах Edge Computing забезпечує локальну обробку даних, що дозволяє швидко реагувати на зміни стану пацієнта без необхідності в надійних підключеннях до інтернету. Fog Computing, у свою чергу, дозволяє обробляти дані на проміжних серверах, що забезпечує більш глибокий аналіз перед передачею даних до центральної хмари. Це особливо корисно для обробки великих обсягів медичних зображень або для забезпечення довготривалого моніторингу пацієнтів з високими вимогами до надійності та зберігання даних. На рис. 1. проілюстровано архітектуру систем медичного моніторингу з використанням Edge Computing та Fog Computing.



**Рис. 1. Архітектура систем медичного моніторингу з використанням Fog Computing та Edge Computing**

*Джерело: сформовано автором*

У системах медичного моніторингу на основі Edge Computing всі дані обробляються безпосередньо на периферійних пристроях, таких як сенсори або мобільні пристрої. Цей підхід забезпечує мінімальну затримку та швидку реакцію на зміни стану пацієнта, оскільки обробка даних відбувається локально. Після обробки, якщо потрібно, дані можуть бути передані до центральної хмари для подальшого зберігання або аналізу. Ця архітектура є ідеальною для ситуацій, коли важлива негайна обробка та реагування.

У випадку використання Fog Computing периферійні пристрої (Edge Devices), такі як сенсори або мобільні пристрої, збирають дані та передають їх до локальних серверів (Fog Nodes) для проміжної обробки. Потім оброблені дані можуть бути відправлені до центральної хмари для тривалого зберігання або глибокого аналізу. Цей підхід дозволяє знизити затримки, забезпечити високу надійність і масштабованість системи, що є особливо важливим для великих та розподілених медичних мереж. Однак, не можна розглядати ці технології ізольовано.

Впровадження Edge Computing та Fog Computing у медичні інфраструктури передбачає їх інтеграцію в загальну архітектуру системи, де вони доповнюють одна одну. Поєднання обох підходів дозволяє створити гнучку і надійну інфраструктуру, яка здатна адаптуватися до різних умов експлуатації [10, 12]. Наприклад, Edge Computing може забезпечувати миттєву обробку критичних даних на місцевому рівні, в той час як Fog Computing може виконувати більш комплексні завдання обробки та аналізу даних, що потребують більш значних обчислювальних ресурсів і координації між кількома вузлами.

Застосування технологій Edge Computing та Fog Computing у медичних інфраструктурах зіштовхується з різними умовами та проблемами, які впливають на їхню ефективність. Кожна з цих технологій демонструє свої переваги у певних ситуаціях, допомагаючи вирішувати специфічні задачі медичних установ. Таблиця 4 порівнює використання Edge і Fog Computing в різних умовах медичних інфраструктур, ілюструючи, як кожна технологія адаптується до цих умов та вирішує виникаючі проблеми.

Таблиця ілюструє, як Edge Computing та Fog Computing відповідають на різні виклики, що виникають у медичних інфраструктурах. Edge Computing забезпечує миттєву обробку даних на місці їх отримання, що є критичним для оперативного реагування в умовах, де затримка може коштувати життя, наприклад, в інтенсивній терапії. У випадках, коли необхідно обробляти великі обсяги даних з різних джерел, як у великих лікарнях чи медичних центрах, Fog Computing демонструє свою ефективність, розподіляючи обробку між кількома вузлами і знижуючи навантаження на центральні сервери. Обидві технології сприяють підвищенню безпеки та надійності систем, проте кожна має свої специфічні переваги в залежності від умов використання.

Щоб розробити методологію вибору між Edge Computing і Fog Computing для медичних систем моніторингу, необхідно врахувати цілий ряд факторів, які впливають на ефективність і впровадження кожної з цих технологій. Методологія повинна включати кілька ключових етапів, що дозволяють систематично оцінити і порівняти ці технології з точки зору їх застосування в медичних інфраструктурах:

Таблиця 4

## Порівняння використання Edge та Fog Computing в умовах медичних інфраструктур

Умови/Проблеми використання	Edge Computing	Fog Computing
Затримка у доступі до критичної інформації	Обробка даних на місці отримання зменшує затримку, забезпечуючи швидкий доступ до критичної інформації.	Використання розподіленої обробки дозволяє знизити затримку, але менше ефективно в екстремально критичних ситуаціях.
Обмежена пропускна здатність мережі	Знижує обсяг даних, які потрібно передавати, обробляючи їх локально, що зменшує навантаження на мережу.	Залучення проміжних вузлів для часткової обробки дозволяє зменшити навантаження на центральну мережу, але не вирішує проблему повністю.
Нестабільний зв'язок між медичними пристроями і центральними серверами	Забезпечує автономну обробку даних при відсутності зв'язку з сервером, що критично в умовах відсутності стабільного інтернету.	Fog Computing знижує залежність від центральних серверів, використовуючи проміжні вузли для обробки даних, але потребує більш надійного зв'язку для координації вузлів.
Конфіденційність і безпека чутливих медичних даних	Локальна обробка знижує ризик витоку інформації, оскільки дані залишаються на периферії.	Розподілена обробка даних дозволяє додатково шифрувати і захищати дані на різних етапах, що підвищує загальну безпеку.
Інтеграція і сумісність з існуючими медичними системами	Може вимагати спеціальної адаптації для роботи з різними типами медичних пристроїв.	Більш гнучка і масштабована архітектура дозволяє легше інтегруватися з існуючими системами і забезпечити сумісність.
Обробка великих обсягів даних з різних відділень лікарні	Обмежені можливості для одночасної обробки великих масивів даних через невеликі ресурси на периферії.	Забезпечує ефективну обробку великих обсягів даних завдяки розподіленню обчислювальних задач між кількома вузлами.

Джерело: сформовано автором на підставі [7, 8, 11, 15, 16]

– Аналіз вимог – визначення специфічних потреб медичних систем, таких як швидкість обробки даних, надійність, масштабованість і інтеграція з існуючими системами.

– Оцінка технологій – використання різних методів для оцінки Edge Computing і Fog Computing в контексті їх відповідності вимогам.

– Порівняння результатів – формування комплексного порівняння, що включає як технічні, так і економічні аспекти кожної технології.

– Прийняття рішення – вибір найбільш відповідної технології на основі зібраних даних і проведеного аналізу [13, 14].

Методології вибору технологій для медичних систем моніторингу представлено в табл. 5.

Таблиця 5

## Методології вибору технологій для медичних систем моніторингу

Методологія	Опис	Edge Computing	Fog Computing
Метод сценарного аналізу	Оцінка технологій через сценарії, що імітують реальні умови використання.	Сценарії для координації даних між різними медичними пристроями в мережі.	Сценарії для координації даних між різними медичними пристроями в мережі.
Метод моделювання навантаження	Оцінка продуктивності технологій в умовах різного навантаження і використання.	Оцінка швидкості і зменшення затримок при обробці даних на рівні пристроїв.	Оцінка ефективності обробки даних у розподілених вузлах при високих навантаженнях.
Метод інтеграційного аналізу	Аналіз можливості інтеграції технологій з існуючими системами та їхню гнучкість.	Інтеграція з медичними пристроями через локальні шлюзи та датчики.	Інтеграція з централізованими системами через розподілені вузли і обробка даних в хмарах.
Метод порівняння витрат і вигод	Оцінка економічної доцільності технологій з урахуванням витрат на впровадження і підтримку.	Витрати на обладнання та обслуговування локальних вузлів.	Витрати на розподілену інфраструктуру та комунікаційні витрати між вузлами.

Джерело: сформовано автором

Метод сценарного аналізу на практиці використовує моделювання реальних медичних ситуацій для перевірки, як швидко і ефективно кожна технологія може реагувати на критичні зміни в стані пацієнта: Edge Computing оцінюється за його здатністю обробляти дані локально на пристроях, а Fog Computing – за здатністю інтегрувати дані з різних пристроїв у розподіленій мережі. Метод моделювання навантаження перевіряє, як технології справляються з високими навантаженнями: для Edge Computing це включає тести на продуктивність окремих пристроїв, а для Fog Computing – оцінку обробки даних в умовах інтенсивного трафіку між вузлами. Метод інтеграційного аналізу оцінює, як кожна технологія вписується в існуючу інфраструктуру: Edge Computing перевіряється на предмет легкості інтеграції з локальними медичними пристроями, тоді як Fog Computing оцінюється за ефективністю зв'язку і координації даних між розподіленими вузлами. Метод порівняння витрат і вигод аналізує економічні аспекти впровадження: для Edge Computing враховуються витрати на локальні пристрої і їх обслуговування, тоді як для Fog Computing розглядаються витрати на розподілену інфраструктуру і комунікації між вузлами. Ці методології допомагають визначити оптимальний підхід для конкретних медичних умов, забезпечуючи ефективність, інтеграцію та економічну доцільність вибраної технології. Процес вибору найбільш підходящої технології для медичних систем представлено на рис. 2.



**Рис. 2. Процес вибору технології для медичних систем**

*Джерело: сформовано автором*

Схема ілюструє процес вибору найбільш підходящої технології для медичних систем. Процес починається з аналізу вимог, далі переходить до оцінки технологій за допомогою обраних методологій, потім здійснюється порівняння результатів і закінчується прийняттям обґрунтованого рішення. Це забезпечує систематичний підхід до вибору технології на основі всебічного аналізу і порівняння.

Впровадження технологій Edge Computing та Fog Computing у системи медичного моніторингу є необхідним кроком для підвищення ефективності обробки даних, зниження затримок у передачі інформації та оптимізації використання обчислювальних ресурсів. Обидва підходи спрямовані на розв'язання проблем, пов'язаних із централізованою обробкою великих обсягів даних, що є критично важливим у медичних системах, де від швидкості та точності обробки даних залежать життя пацієнтів. Вибір між Edge і Fog Computing залежить від конкретних вимог системи, ресурсних обмежень та особливостей інфраструктури медичного закладу.

Успішне впровадження технологій Edge Computing та Fog Computing у системи медичного моніторингу потребує врахування кількох важливих аспектів. По-перше, необхідно забезпечити ефективну обробку даних безпосередньо на пристроях або у найближчих до них вузлах, що дозволить знизити затримки у передачі інформації та підвищити швидкість реагування системи. По-друге, критично важливо врахувати ресурсні обмеження, зокрема енергоефективність та доступність обчислювальних потужностей, що є особливо актуальним у медичних системах, які повинні функціонувати безперебійно.

По-третє, слід зосередитися на забезпеченні високого рівня безпеки і конфіденційності даних, оскільки медична інформація є надзвичайно чутливою і вимагає надійного захисту. Також важливо забезпечити можливість масштабування системи та її гнучкість, що дозволить адаптуватися до змін у кількості підключених пристроїв та обсязі оброблюваних даних. Додатково, необхідно провести

навчання медичного персоналу для ефективного використання нових технологій і забезпечити регулярний моніторинг системи для своєчасного виявлення і виправлення можливих проблем.

У таблиці 6 запропоновано рекомендації, які враховують сучасні виклики та ресурсні обмеження при впровадженні Edge Computing та Fog Computing у системи медичного моніторингу.

Таблиця 6

**Рекомендації щодо впровадження Edge та Fog Computing у системи медичного моніторингу**

Напрямок	Рекомендації для Edge Computing	Рекомендації для Fog Computing
Обробка даних	Впровадження легких алгоритмів для локальної обробки на пристроях, мінімізуючи навантаження на центральні сервери.	Використання гібридних моделей обробки, що поєднують локальну обробку з передачею даних на регіональні сервери для подальшого аналізу.
Інфраструктурні ресурси	Розробка енергоефективних рішень для зменшення споживання енергії пристроями, що працюють на батареях.	Розгортання серверів ближче до кінцевих користувачів для зменшення затримок та підвищення доступності обчислювальних ресурсів.
Безпека та конфіденційність	Шифрування даних на пристроях та забезпечення безпеки при передачі інформації в реальному часі.	Впровадження багаторівневих систем безпеки з шифруванням на всіх етапах обробки та передачі даних між пристроями та серверами.
Масштабування та гнучкість	Забезпечення можливості швидкого додавання нових пристроїв без значних змін у системі.	Створення масштабованої інфраструктури, що дозволяє легко адаптуватися до збільшення кількості пристроїв та обсягу даних.
Затримка в обробці даних	Використання пристроїв з більш потужними процесорами та оптимізованими мережевими інтерфейсами для мінімізації затримок.	Забезпечення оптимального розташування серверів для мінімізації затримок у передачі даних між пристроями та серверами.
Навчання персоналу	Проведення навчальних програм для медичного персоналу щодо роботи з новими пристроями та технологіями Edge Computing.	Організація тренінгів для персоналу, акцентуючи увагу на роботі з гібридними системами обробки даних у рамках Fog Computing.
Моніторинг та оптимізація	Встановлення систем моніторингу для відстеження ефективності обробки даних на пристроях Edge Computing.	Регулярний моніторинг роботи серверів та кінцевих пристроїв з метою вчасного виявлення та виправлення можливих проблем у системі.

*Джерело: сформовано автором*

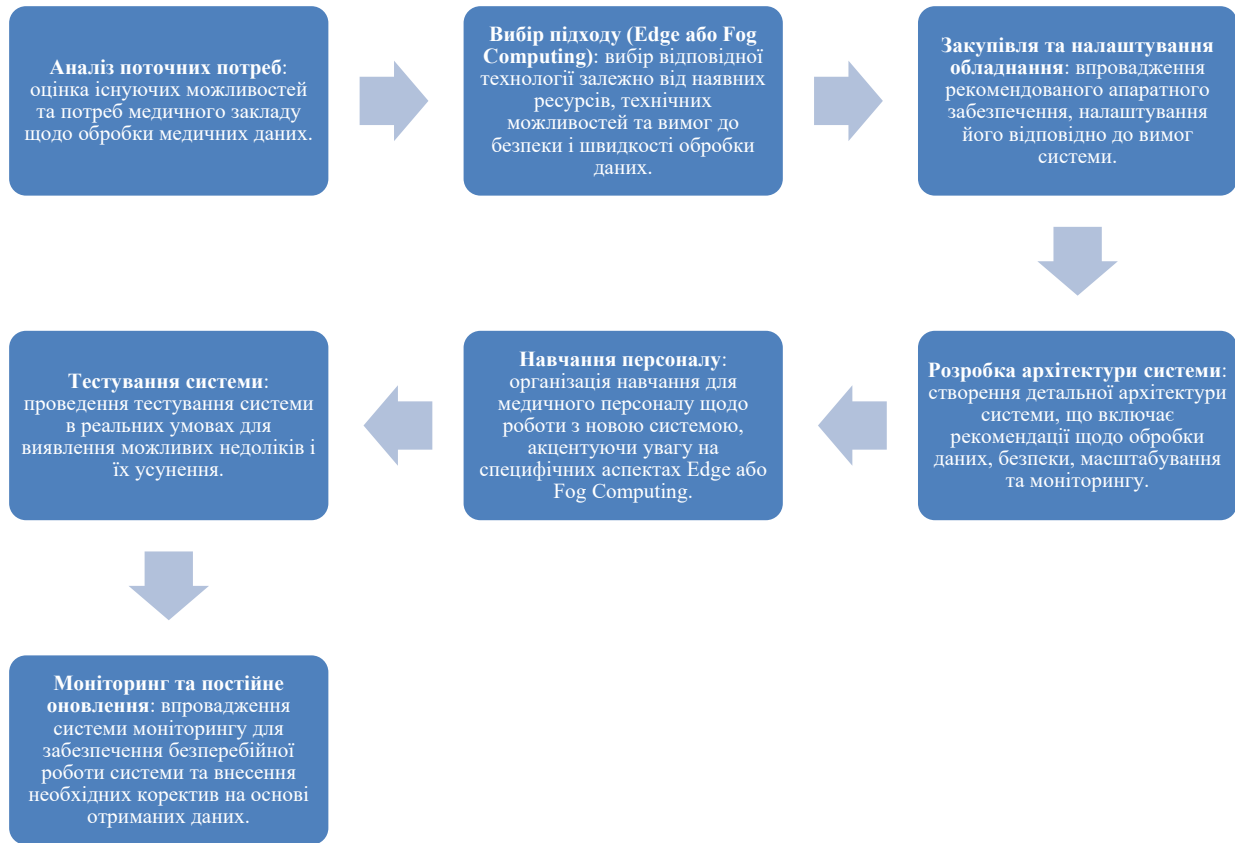
В умовах сучасної медицини, де швидкість і точність обробки даних безпосередньо впливають на життя пацієнтів, впровадження рекомендацій з таблиці дозволить вирішити кілька критичних проблем. По-перше, завдяки локальній обробці даних у межах Edge Computing можна значно зменшити затримки при отриманні і аналізі медичних показників, що особливо важливо у випадках, коли кожна секунда має значення. Це дозволить оперативніше реагувати на зміни в стані пацієнта, що підвищує ефективність лікування.

По-друге, оптимізація використання інфраструктурних ресурсів через розгортання Fog Computing допоможе вирішити проблему обмеженості центральних серверів та забезпечить більш рівномірний розподіл обчислювальних навантажень. Це сприятиме зниженню ризиків перевантаження системи та підвищенню її стійкості.

По-третє, впровадження багаторівневих систем безпеки дозволить знизити ризики несанкціонованого доступу до чутливих медичних даних, що є особливо актуальним у сучасних умовах зростання кіберзагроз. Також, рекомендації щодо масштабування і гнучкості систем дозволять медичним закладам легко адаптувати свої системи моніторингу до зростання кількості пацієнтів або збільшення обсягу оброблюваних даних, не втрачаючи ефективності. Алгоритм ефективного впровадження Edge та Fog Computing у системи медичного моніторингу представлено на рис. 3.

Алгоритм впровадження рекомендацій забезпечує ефективну інтеграцію Edge та Fog Computing у системи медичного моніторингу. Він дозволяє вибрати оптимальну технологію, спланувати надійну архітектуру, навчити персонал та проводити постійний моніторинг системи. Це допомагає підвищити швидкість і надійність обробки даних, забезпечити безпеку медичної інформації, та адаптувати систему до змін у навантаженні. Завдяки цьому, медичні заклади можуть оперативно реагувати на потреби пацієнтів та знижувати ризики кіберзагроз.





**Рис. 3. Алгоритм ефективного впровадження Edge та Fog Computing у системи медичного моніторингу**

*Джерело: сформовано автором*

**Висновки даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.** У результаті дослідження було встановлено, що технології Edge Computing та Fog Computing відіграють важливу роль у сучасних системах медичного моніторингу, забезпечуючи ефективну обробку даних, зниження затримок у передачі інформації та оптимізацію використання обчислювальних ресурсів. Основні проблеми, з якими зіштовхуються ці технології, включають забезпечення надійності систем в умовах нестабільного зв'язку, зниження енергоспоживання при обмежених ресурсах та захист конфіденційності чутливих медичних даних.

На основі проведеного порівняльного аналізу, було рекомендовано впроваджувати Edge Computing для швидкої обробки даних у критичних ситуаціях, що потребують мінімальної затримки, тоді як Fog Computing є більш доцільним для великих і розподілених систем, де важлива надійність та масштабованість.

Так, розробка методології інтеграції Edge та Fog Computing у медичні системи забезпечить гнучкість, надійність і безпеку в обробці даних. Це включає розробку нових алгоритмів обробки даних та адаптацію існуючих технологій до вимог медичних інфраструктур.

Перспективи подальших досліджень включають розробку нових моделей для аналізу даних у системах медичного моніторингу, а також вивчення можливостей інтеграції цих моделей у різні галузі медицини, що дозволить значно підвищити ефективність і надійність роботи медичних інформаційних систем.

#### Список використаних джерел:

1. Нестеров В. Визначення впливу методів візуалізації даних на процеси прийняття бізнес-рішень. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2024. № 1. С. 60–70. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.1.7>.
2. Al Mudawi N. Integration of IoT and fog computing in healthcare based on smart intensive units. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 59906–59918. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3179704>.
3. Alwakeel A. An overview of fog computing and edge computing security and privacy issues. *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 24. 8226. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21248226>.

4. Aslanpour M., Gill S., Toosi A. Performance evaluation metrics for cloud, fog and edge computing: A review, taxonomy, benchmarks and standards for future research. *Internet of Things*. 2020. Vol. 12. 100273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100273>.
5. Dash S., Tripathy A., Pradhan S. K., Rath S. K. Edge and fog computing in healthcare – A review. *Scalable Computing: Practice and Experience*. 2019. Vol. 20, № 2. P. 191–206. DOI: <https://doi.org/10.12694/scpe.v20i2.1504>.
6. Dong P., Bi Y., Wang Y., Wu H., Xing X. Edge computing based healthcare systems: Enabling decentralized health monitoring in Internet of medical Things. *IEEE Network*. 2020. Vol. 34, № 5. P. 254–261. DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.011.1900636>.
7. Hartmann M., Hashmi U., Imran A. Edge computing in smart health care systems: Review, challenges, and research directions. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2022. Vol. 33, № 3. DOI: <https://doi.org/10.1002/ett.3710>.
8. Kumar V., Kaur M., Tomar S. Comparison of fog computing & cloud computing. *International Journal of Mathematical Sciences and Computing*. 2019. Vol. 1. P. 31–41. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijmsc.2019.01.03>.
9. Laroui M., Taleb T., Serhrouchni A. Edge and fog computing for IoT: A survey on current research activities & future directions. *Computer Communications*. 2021. Vol. 180. P. 210–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.09.003>.
10. Mendiboure L., Chalouf M.A., Krief F. Edge computing based applications in vehicular environments: Comparative study and main issues. *Journal of Computer Science and Technology*. 2019. Vol. 34. P. 869–886. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11390-019-1947-3>.
11. Muneeb M., Ko K.-M., Park Y.-H. A fog computing architecture with multi-layer for computing-intensive IoT applications. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 24. 11585. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112411585>.
12. Mutlag A., Ghani I., Arunkumar N., Mohammed M., Baker T. Enabling technologies for fog computing in healthcare IoT systems. *Future Generation Computer Systems*. 2019. Vol. 90. P. 62–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.07.049>.
13. Prasad V. K., Bhavsar M. D., Tanwar S. Influence of monitoring: Fog and edge computing. *Scalable Computing: Practice and Experience*. 2019. Vol. 20, № 2. P. 365–376. DOI: <https://doi.org/10.12694/scpe.v20i2.1533>.
14. Rajavel R., Ravichandran S.K., Harimoorthy K., et al. IoT-based smart healthcare video surveillance system using edge computing. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2022. Vol. 13. P. 3195–3207. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-021-0>
15. Ray P., Dash D., De D. Edge computing for Internet of Things: A survey, e-healthcare case study and future direction. *Journal of Network and Computer Applications*. 2019. Vol. 140. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.05.005>.
16. Seljakanmani S., Sumathi M. Fuzzy assisted fog and cloud computing with MIoT system for performance analysis of health surveillance system. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2021. Vol. 12, № 3. P. 3423–3436. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02156-y>.
17. Shakarami A., Mahmud R., Kochanski M., Buyya R. Resource provisioning in edge/fog computing: A comprehensive and systematic review. *Journal of Systems Architecture*. 2022. Vol. 122. 102362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2021.102362>.
18. Singh S.P., Taneja M., Davy A. Fog computing: from architecture to edge computing and big data processing. *The Journal of Supercomputing*. 2019. Vol. 75. P. 2070–2105. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-018-2701-2>.