

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-41>

УДК 621.391

Васильківський Микола Володимирович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>

Коломієць Альона Анатоліївна, д.пед.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-2120-7644>

Будаш Михайло Володимирович, аспірант

Прикмета Андрій Володимирович, аспірант

Олійник Андрій Олегович, аспірант

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ІНТЕРНЕТУ МЕДИЧНИХ РЕЧЕЙ В МЕРЕЖІ СТАНДАРТУ 5G

Васильківський М.В., Коломієць А.А., Будаш М.В., Прикмета А.В., Олійник А.О. **Забезпечення якості обслуговування інтернету медичних речей в мережі стандарту 5G.** У роботі вирішується актуальна науково-прикладна проблема забезпечення якості обслуговування (QoS) Інтернету медичних речей (IoMT) в мережі стандарту LTE/5G. Запропоновано класифікацію трафіку за пріоритетами, яка включає чотири класи якості, що дозволяє забезпечити пріоритетну обробку критичного медичного трафіку і оптимізувати використання мережевих ресурсів. Розглянуті рішення дозволяють забезпечити необхідні параметри QoS для критичних медичних додатків, таких як мінімальна затримка і висока надійність передачі даних, що є критично важливим для систем охорони здоров'я. Здійснено комплексний аналіз проблем управління якістю обслуговування (QoS) для Інтернету медичних речей (IoMT) у мережах 5G. Розглянуто взаємодію мережі стандарту 5G з мережею IoMT, а також особливості підвищення QoS для медичних пристроїв і додатків. Визначено критичні вимоги до якості обслуговування медичних додатків, включаючи мінімальну затримку, низький джитер, високу пропускну здатність і максимальну надійність. Проаналізовано виклики, пов'язані з обслуговуванням IoMT-пристроїв у мережах 5G, зокрема високі вимоги до QoS для тактильного інтернету (TI). Досліджено способи інтеграції IoMT-пристроїв у мережу 5G, враховуючи специфічні вимоги медичних додатків. Запропоновано методи попередньої обробки запитів у мережі IoMT перед передачею їх у мережу 5G для зменшення навантаження на базові станції. Розглянуто класифікацію трафіку за пріоритетами, яка включає чотири класи якості, що дозволяє ефективно керувати ресурсами мережі і забезпечувати необхідний рівень QoS. Досліджено алгоритми динамічного управління ресурсами та пріоритетами, які дозволяють забезпечити належний рівень обслуговування навіть при високому завантаженні мережі. Використання сучасних технологій, таких як SDN і NFV, для гнучкого управління мережевими ресурсами і адаптації до змінних умов експлуатації. Дослідження підтвердило важливість класифікації трафіку, динамічного управління ресурсами та пріоритетного обслуговування для забезпечення високої якості обслуговування медичних пристроїв і додатків у мережах 5G.

Ключові слова: LTE, 5G, Інтернет медичних речей (IoMT), телекомунікаційна мережа.

Vasylykivskiy M., Kolomiets A., Budash M., Prykmeta A., Oliynyk A. **Ensuring the quality of the internet of medical things services in the 5G network.** The paper solves an urgent scientific and applied problem of ensuring the quality of service (QoS) of the Internet of Medical Things (IoMT) in an LTE/5G network. A traffic prioritization classification is proposed, which includes four quality classes, allowing for priority processing of critical medical traffic and optimizing the use of network resources. The considered solutions allow to provide the necessary QoS parameters for critical medical applications, such as minimum latency and high reliability of data transmission, which is critical for healthcare systems. A comprehensive analysis of the problems of quality of service (QoS) management for the Internet of Medical Things (IoMT) in 5G networks is carried out. The interaction of the 5G network with the IoMT network, as well as the features of improving QoS for medical devices and applications are considered. Critical requirements for the quality of service for medical applications are identified, including minimum latency, low jitter, high throughput, and maximum reliability. The challenges associated with servicing IoMT devices in 5G networks are analyzed, in particular, the high QoS requirements for the tactile Internet (TI). Ways to integrate IoMT devices into a 5G network, taking into account the specific requirements of medical applications, are investigated. Methods for preprocessing requests in the IoMT network before transmitting them to the 5G network are proposed to reduce the load on base stations. The traffic classification by priorities, which includes four quality classes, is considered, which allows to effectively manage network resources and provide the required level of QoS. The algorithms for dynamic resource and priority management are investigated, which allow to ensure an adequate level of service even at high network load. The use of modern technologies such as SDN and NFV for flexible management of network resources and adaptation to changing operating conditions. The study confirmed the importance of traffic classification, dynamic resource management, and priority service to ensure high quality of service for medical devices and applications in 5G networks.

Keywords: LTE, 5G, Internet of Medical Things (IoMT), telecommunications network.

Постановка наукової проблеми. Розгортання 5G технологій відбувається в декілька етапів, що дозволяє поступово інтегрувати нові можливості та підвищити ефективність мобільних мереж. Наведемо кілька ключових аспектів, які стосуються управління якістю обслуговування (QoS) для Інтернету медичних речей (IoMT) в мережах 5G. Технологія 5G забезпечує значно вищі швидкості передачі даних у порівнянні з 4G, що критично важливо для реального часу передачі медичних даних, таких як відео з камер спостереження пацієнтів або великі обсяги даних з медичних датчиків.

Технологія 5G має затримки, що можуть бути меншими ніж 1 мс, що важливо для критично важливих додатків, наприклад, для дистанційної хірургії або моніторингу пацієнтів у реальному часі. Технологія 5G підтримує більшу кількість підключених пристроїв на одиницю площі, що дозволяє розгорнути більше медичних сенсорів і пристроїв в обмеженому просторі, наприклад, в лікарнях або медичних центрах. Стандарт 5G пропонує кращу енергоефективність, що зменшує споживання енергії пристроями ІоМТ, подовжуючи термін їх автономної роботи. Також важливими факторами розвитку мереж є виклики та рішення для управління QoS в ІоМТ на базі 5G. Для забезпечення надійного і безпечного зв'язку для чутливих медичних даних передбачено використання шифрування даних, аутентифікації користувачів та технологій блокчейн для безпечного зберігання та передачі даних. Для оптимального розподілення мережевих ресурсів між різними пристроями і додатками передбачено використання технологій Network Slicing для створення віртуальних сегментів мережі, які забезпечують різні рівні QoS для різних типів трафіку. Для постійного моніторингу якості обслуговування для своєчасного виявлення та усунення проблем передбачено впровадження систем моніторингу в реальному часі, що дозволяють автоматично коригувати параметри мережі для забезпечення відповідності вимогам QoS. Для забезпечення сумісності нових 5G технологій з існуючими системами медичного обслуговування та пристроями передбачено використання стандартних протоколів і інтерфейсів для забезпечення безшовної інтеграції з існуючими системами. Для гарантування безперебійної роботи мережі в разі збоїв або катастроф передбачено використання методів резервування та відновлення, таких як мультихопові маршрути і георезервування даних [1].

Отже, 5G технології відкривають нові можливості для розвитку ІоМТ, забезпечуючи вищу швидкість, меншу затримку і більшу надійність зв'язку. Однак, для ефективного управління якістю обслуговування в ІоМТ необхідно вирішити ряд викликів, включаючи безпеку даних, динамічне управління ресурсами та інтероперабельність з існуючими системами. Це вимагає комплексного підходу та використання передових технологій.

Метою дослідження є адаптація систем Інтернету медичних речей (ІоМТ) до мережі 5G із використанням основ побудови високоефективних систем ІоМТ в умовах обмежених ресурсів мережі 5G. Основні напрямки дослідження включають:

- вивчення сценаріїв передачі даних в умовах мережі 5G, враховуючи специфічні вимоги медичних пристроїв;
- аналіз методів динамічного розподілу та управління ресурсами мережі для забезпечення стабільної роботи ІоМТ пристроїв, з урахуванням їхніх вимог до пропускну здатності, енергоспоживання та затримок;
- визначення алгоритмів забезпечення високого рівня QoS, включаючи моніторинг та управління потоками трафіку, профілювання трафіку та планування ресурсів;
- формування підходів інтеграції ІоМТ з мережею 5G, враховуючи обмежені ресурси та високі вимоги до якості обслуговування. Дослідження спрямоване на подолання існуючих викликів у сфері ІоМТ та забезпечення надійного і ефективного функціонування медичних пристроїв у середовищі 5G.

Для досягнення поставленої мети, необхідно вирішити ряд задач, кожна з яких спрямована на різні аспекти адаптації Інтернету медичних речей (ІоМТ) до мережі 5G. Задачі формують структуру та зміст дослідження:

1. Аналіз існуючих методів управління якістю обслуговування (QoS) ІоМТ в мобільних мережах 5G для визначення поточного стану технологій QoS в контексті ІоМТ та 5G.
2. Узагальнення теорії функціонування ІоМТ в умовах мереж 5G, визначення компонентів мережі для ефективної роботи медичних пристроїв.
3. Узагальнення підходів до адаптивного управління QoS, що дозволить ефективно розподіляти ресурси мережі та забезпечувати необхідну якість обслуговування.
4. Визначення показників QoS, таких як затримка, пропускну здатність та надійність для оцінки ефективності функціонування ІоМТ у мережі 5G.
5. Узагальнення методів адаптивного керування розподілом ресурсів для забезпечення високої якості обслуговування медичних пристроїв. Вирішення цих взаємопов'язаних задач дозволить сформувати комплексний підхід до адаптації ІоМТ до мережі 5G, забезпечити необхідну якість обслуговування та ефективне використання мережевих ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологія 5G забезпечує основні типи послуг з'єднання, які мають критичне значення для різних сфер використання, включаючи Інтернет

медицини речей (ІоМТ). Розглянемо ці послуги детальніше та їхню роль в контексті ІоМТ. Розширене мобільне широкопasmове з'єднання (eMBB) забезпечує високу пропускну здатність для підтримки додатків, які вимагають великих обсягів даних, таких як відео у форматі UHD, віртуальна та доповнена реальність. Мережа може динамічно виділяти пропускну здатність для забезпечення оптимальної роботи різних додатків. Висока швидкість передачі даних дозволяє проводити відеоконсультації з лікарями та моніторинг стану пацієнтів у реальному часі. Технологія eMBB дозволяє передавати великі медичні файли, такі як МРТ-сканування або результати інших обстежень. Ультранадійний і з низькою затримкою зв'язок (uRLLC) забезпечує критично важливі послуги з високою надійністю та мінімальні затримки у передачі даних, що особливо важливо для додатків, де час реакції є критичним [2].

Висока надійність і низька затримка дозволяють лікарям проводити операції на відстані за допомогою роботизованих систем. Зниження затримки дозволяє миттєво реагувати на зміни в стані пацієнта, що критично важливо для пацієнтів з хронічними захворюваннями або в критичному стані. Масивні комунікації машинного типу (mMTC) забезпечують підтримку мільйонів підключених пристроїв на квадратний кілометр. Пристрої mMTC мають низьке енергоспоживання, що дозволяє їм працювати тривалий час без необхідності частого заряджання. Технологія mMTC підтримує великий обсяг підключених медичних пристроїв, таких як датчики моніторингу стану здоров'я, що передають дані про пацієнтів до медичних центрів та дозволяє збирати та аналізувати великі обсяги даних з багатьох медичних пристроїв одночасно, що сприяє ефективному управлінню здоров'ям пацієнтів [3].

Отже, технологія 5G з її основними типами послуг з'єднання (eMBB, uRLLC, mMTC) відкриває нові можливості для розвитку Інтернету медичних речей (ІоМТ), забезпечуючи високу швидкість, надійність, низьку затримку та підтримку великої кількості пристроїв. Це дозволяє впроваджувати інноваційні медичні рішення, підвищувати ефективність лікування та покращувати якість медичних послуг. Технологія 5G забезпечує низьку ключових характеристик, які значно покращують можливості мереж і розширюють спектр послуг, особливо в контексті Інтернету медичних речей (ІоМТ). Наведемо основні характеристики 5G та їх вплив на ІоМТ. Висока пропускну здатність (до 20 Гб/с на одну базову станцію) дозволяє швидко передавати великі обсяги медичних даних, включаючи результати діагностичних тестів і зображень високої роздільної здатності (наприклад, МРТ та КТ сканів). Швидкість завантаження даних для одного абонента до 100 Мб/с і вивантаження до 50 Мб/с забезпечує достатню швидкість для реального часу відео-консультацій, дистанційного моніторингу пацієнтів та інших телемедичних послуг. Можливість абонентському пристрою рухатись зі швидкістю до 500 км/год забезпечує надійний зв'язок для мобільних медичних пристроїв, таких як швидкі допомоги, які можуть переміщуватись на високих швидкостях, підтримуючи безперервний доступ до медичних даних і консультацій. Перемикання між режимом заощадження енергії та повністю робочим режимом за 10 мс забезпечує важливу енергоефективність пристроїв ІоМТ, які повинні працювати тривалий час без підзарядки. Швидке перемикання між режимами дозволяє економити енергію, не втрачаючи продуктивності. Затримки передачі даних до 4 мс за сприятливих умов і до 1 мс для спеціалізованих з'єднань забезпечують критично важливу низьку затримку для додатків, які вимагають миттєвої реакції, таких як віддалена хірургія або системи моніторингу життєво важливих показників пацієнтів у реальному часі. Ефективне використання радіочастотного спектру підвищує продуктивність мережі, дозволяючи підключати більше пристроїв і забезпечуючи стабільне з'єднання навіть у високонавантажених середовищах, таких як лікарні. Підтримка до 1 млн пристроїв на 1 км² дозволяє підключити величезну кількість медичних датчиків і пристроїв у межах однієї мережі, що особливо корисно для великих лікарень та медичних центрів з великою кількістю обладнання [4].

Завдяки високій швидкості та низькій затримці 5G мережі, дедалі більше завдань обробки і зберігання даних можна передавати на потужні сервери в хмарах. Це дозволяє використовувати менш потужні та енергоефективні пристрої ІоМТ, зберігаючи при цьому високу продуктивність. Низька затримка і висока надійність 5G роблять можливим впровадження таких додатків, як віддалена хірургія, автономні медичні роботи та системи управління безпілотними автомобілями, що транспортують медичні матеріали або пацієнтів. Висока пропускну здатність 5G дозволяє використовувати віртуальну та доповнену реальність у медичних навчаннях, діагностиці та лікуванні. Це може включати віртуальні консультації, віртуальну реабілітацію та інші інноваційні методи лікування. Мережа 5G дозволяє проводити високоякісні відео-консультації, обмінюватись великими медичними файлами та даними в реальному часі, що значно покращує якість та доступ-

ність медичних послуг, особливо в віддалених регіонах. Отже, технологія 5G забезпечує значні покращення в швидкості, надійності та ефективності мобільних мереж, що відкриває нові можливості для розвитку Інтернету медичних речей (IoMT). Це включає швидкі та надійні з'єднання для медичних пристроїв, підтримку критично важливих додатків, ефективне використання енергії та значне розширення можливостей телемедицини [5].

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Технологія 5G використовує декілька ключових технологій і підходів для досягнення високих показників роботи мережі. Розглянемо детальніше про кожен з них і їхній вплив на роботу телекомунікаційних мереж, включаючи Інтернет медичних речей (IoMT). Діапазони електромагнітних хвиль: FR1 (600–6000 МГц) використовується для забезпечення покриття на великих відстанях і проникнення через будівлі та FR2 (24–100 ГГц) використовується для передачі даних на високих швидкостях у міліметровому діапазоні з коротшим радіусом дії. Малі базові станції споживають менше енергії і є компактними. Можливість встановлювати тисячі базових станцій на відстані 250 м одна від одної вирішує проблему швидкого згасання міліметрових хвиль. Забезпечується покриття в густонаселених районах, лікарнях та інших медичних закладах, де потрібна висока щільність підключень і стабільність з'єднань. У базових станціях 5G використовується сотні портів для передачі і прийому даних, що значно підвищує продуктивність. Забезпечення високої пропускної здатності і надійності з'єднань для медичних пристроїв дозволяє передавати великі обсяги даних швидко і без перешкод. Управління напрямленістю сигналів (Beam Forming) дозволяє концентрувати сигнал в напрямку абонента, зменшуючи інтерференцію і покращуючи якість з'єднання. При цьому, підвищується якість зв'язку і зменшуються затримки, що є критичним для додатків реального часу, таких як моніторинг стану пацієнтів або віддалена хірургія. Передача даних в режимі повного дуплексу дозволяє базовій станції і абоненту одночасно передавати і приймати дані, що підвищує ефективність використання спектру. При цьому, підвищується швидкість і ефективність передачі даних, що важливо для безперервного моніторингу медичних показників. Неортогональний множинний доступ (NOMA) дозволяє використовувати один і той же частотний ресурс для кількох користувачів, підвищуючи ефективність використання спектру, що забезпечує підключення більшої кількості медичних пристроїв одночасно без втрати якості обслуговування. Кодування з малою щільністю перевірок на парність (LDPC) забезпечує ефективне кодування і декодування даних з мінімальними помилками, що підвищує надійність передачі медичних даних, що критично для точності і своєчасності медичних послуг [6]. Отже технологія 5G, використовуючи діапазони FR1 і FR2, малі базові станції, масиви антенних систем MIMO, Beam Forming, повний дуплекс, NOMA та LDPC, забезпечує високу швидкість, надійність і ефективність телекомунікаційних мереж. Це відкриває нові можливості для розвитку Інтернету медичних речей (IoMT), забезпечуючи стабільні та швидкі з'єднання для медичних пристроїв, підвищуючи якість медичних послуг і покращуючи результати лікування.

Забезпечення якості обслуговування (QoS) у мобільних мережах п'ятого покоління (5G) для Інтернету медичних речей (IoMT) вимагає комплексного підходу, що охоплює різні сфери управління мережевими ресурсами. Основні області вирішення завдань QoS включають класифікацію аплікацій, профілювання трафіку, обмеження інтенсивності трафіку, управління чергами та маршрутизацію. Комплексний підхід до управління QoS у мобільних мережах 5G для IoMT дозволяє забезпечити стабільну та якісну роботу медичних пристроїв і додатків. Це вимагає інтегрованого застосування різних механізмів і протоколів, що дозволяє ефективно розподіляти ресурси мережі і забезпечити високий рівень обслуговування [7].

Аналіз методологічних підходів до адаптації систем Інтернету медичних речей (IoMT) до стандарту 5G свідчить про існування протиріч у процесі проектування цих систем. Основні аспекти цих протиріч можна розділити на дві групи.

Конструктивні особливості кожного елемента IoMT вказують на те, що кожен пристрій IoMT має свої унікальні характеристики, які зумовлені його функціональним призначенням. Наприклад, медичні монітори, сенсори, імплантати та інші пристрої мають різні вимоги до енергоспоживання, пропускної здатності, затримки передачі даних та надійності.

Відповідність можливостям мережі 5G вказує на те, що мережа 5G пропонує високі швидкості передачі даних, низькі затримки, високу надійність та підтримку масового підключення пристроїв. Однак, для ефективної роботи кожен елемент IoMT повинен бути адаптований до цих можливостей, що вимагає ретельного проектування та інтеграції.

Для подолання вказаних протиріч можна класифікувати особливості функціонування систем

ІоМТ та враховувати їх при побудові на основі загальних принципів функціонування мережі 5G. Основні кроки в цьому процесі включають: класифікацію пристроїв ІоМТ для визначення різних категорій пристроїв ІоМТ на основі їхніх технічних і функціональних характеристик; врахування специфічних вимог кожної категорії за рахунок визначення вимог до пропускної здатності, енергоспоживання, затримок та надійності для кожної категорії пристроїв; розробку загальної схеми побудови систем ІоМТ на основі інтеграції різних категорій пристроїв ІоМТ в єдину мережу на основі принципів функціонування 5G, таких як гетерогенні мережі, МІМО, міліметрові хвилі [8]; проведення тестувань для перевірки сумісності пристроїв ІоМТ з мережею 5G та внесення необхідних коригувань.

Концепція QoS у стандарті 5G базується на потоках даних, які класифікуються і маркуються за допомогою ідентифікатора QoS Flow Identifier (QFI). Це дозволяє забезпечити високоякісне обслуговування різних типів трафіку, включаючи критично важливі медичні сервіси. Наведемо основні принципи та механізми функціонування QoS у 5G. Потоки зі стандартизованими профілями QoS використовують тільки значення QFI. Потоки зі специфічними для оператора профілями QoS використовують значення QFI і сигналізують атрибути QoS між елементами мережі. Служби End-to-End (E2E) охоплюють мережу або служби додатків між користувачьким обладнанням (UE) і зовнішньою мережею передачі даних, наприклад, Інтернетом. Різні служби E2E потребують диференційованого лікування QoS для забезпечення належної якості обслуговування. Один або кілька SDF можуть транспортуватися в одному потоці 5G QoS, якщо вони мають однакову обробку QoS. Кожен пакет висхідного та низхідного зв'язку зіставляється з потоком QoS, забезпечуючи передачу E2E між UE та User Plane Function (UPF) протягом усього терміну служби сеансу Protocol Data Unit (PDU). Один сеанс PDU може нести один або кілька потоків QoS. Всі потоки QoS певної сесії PDU направляються по одному тунелю NG-U. QoS Flow ID (QFI) використовується для ідентифікації потоку QoS у сесії PDU і є унікальним для кожної сесії PDU. Кожен потік QoS характеризується набором параметрів, таких як ідентифікатор 5G QoS (5QI), пріоритет призначення ресурсів (ARP), гарантована швидкість потоку (GFBR) [9]. Радіоносій може нести один або кілька потоків QoS. Кожен сеанс PDU має унікальний набір радіоносій, і gNodeB вирішує, через який радіоносій відправляти потік QoS. QFI є унікальним у межах кожної сесії PDU, що дозволяє чітко ідентифікувати і відстежувати кожен потік QoS. Система QFI дозволяє операторам налаштовувати і оптимізувати мережеві ресурси відповідно до вимог різних типів трафіку, забезпечуючи високу гнучкість в управлінні QoS. Класифікація і маркування пакетів за допомогою QFI забезпечує диференційовану класифікацію трафіку, що є критичним для підтримки якості обслуговування різних додатків і послуг.

Усі зазначені вище фактори взаємопов'язані і повинні враховуватись узгоджено. Наприклад, класифікація трафіку визначає пріоритети, які впливають на управління чергами і маршрутизацію. Профілювання трафіку допомагає налаштувати обмеження інтенсивності трафіку та розподіл ресурсів мережі. Концепція QoS у стандарті 5G з використанням QFI дозволяє ефективно класифікувати, маркувати і управляти трафіком, забезпечуючи високу якість обслуговування для різних типів додатків, включаючи критично важливі медичні сервіси ІоМТ. Взаємопов'язаність і узгодженість між різними механізмами та протоколами QoS є ключовими для досягнення оптимальної роботи мережі [10].

Отже, системи Інтернету медичних речей (ІоМТ) значно виграють від впровадження мереж стільникового зв'язку стандарту 5G завдяки його передовим технологіям і здатності задовольняти різноманітні вимоги ІоМТ. Основні функції та можливості 5G, що сприяють розвитку ІоМТ, включають:

1. Гетерогенні мережі (HetNet), які забезпечують безперервне та надійне підключення пристроїв ІоМТ за рахунок інтеграції різних типів мереж.
2. МІМО (Multiple Input Multiple Output), що підвищує пропускну здатність і стійкість до перешкод, що особливо важливо для критичних медичних застосувань.
3. Міліметрові хвилі (mmWave) дозволяють досягти високих швидкостей передачі даних, що необхідно для оперативного обміну великою кількістю медичної інформації.
4. Зв'язок між пристроями (D2D) підвищує ефективність передачі даних і знижує затримки, що важливо для пристроїв, які потребують швидкого реагування.
5. Програмно-конфігурована мережа (SDN) забезпечує гнучке управління мережевими ресурсами та оптимізацію трафіку, що дозволяє адаптувати мережу під потреби ІоМТ.
6. Віртуалізація мережевих функцій (NFV) спрощує розгортання і управління мережевими

сервісами, що прискорює впровадження нових рішень для ІоМТ. Вказані технології сприяють підвищенню якості обслуговування (QoS) пристроїв ІоМТ, забезпечуючи надійне та ефективне підключення, необхідне для сучасних медичних рішень [11].

Функція CQCF (Control of Quality of Service) в мережі 5G забезпечує контроль якості обслуговування в реальному часі, керуючи потоками трафіку на основі встановлених рівнів QoS. Основні механізми контролю QoS включають: аналіз і класифікація трафіку для забезпечення оптимального обслуговування; розподіл ресурсів мережі відповідно до пріоритетів і вимог QoS; контроль і регулювання потоків для підтримки стабільної якості обслуговування.

Функція CQMF (Management of Quality of Service) в мережі 5G забезпечує: підтримку QoS згідно з договорами SLA за рахунок забезпечення відповідності якості обслуговування умовам договорів; постійне спостереження за станом QoS для виявлення і вирішення проблем; регулярне технічне обслуговування для забезпечення стабільної роботи системи; адаптацію та масштабування рівнів QoS відповідно до змінних вимог і умов [12]. Розглянуті проблеми ІоМТ та запропоновані засоби їх розв'язання зведено в табл. 1.

Таблиця 1. Проблеми ІоТ та засоби їх розв'язання

Проблеми ІоМТ	Вирішення
Енергоефективність	MIMO
Масштабованість	Ретранслятори
Інтелектуальна обробка та збереження	MmWave, D2D
Інформаційна безпека	HetNet, D2D, MIMO, SDN
Функціональна сумісність	D2D

Вирішення проблеми енергоефективності можливе, якщо обладнання підключається за допомогою датчиків лише при необхідності застосування, без з'єднання з базовою станцією, що знижує споживання енергії. У табл. 2. представлено методи збору та обробки інформації від ІоМТ.

Таблиця 2. Основні характеристики методів збору та обробки інформації від ІоМТ [1, 4].

Метод	Протоколи та технології	Апаратні засоби	Інфраструктура
Прямий зв'язок	NB-IoMT	Розумні об'єкти, шлюз	Хмарні сервери
Метод збору та обробки інформації за допомогою шлюзу	Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee	Розумні об'єкти, шлюз	Хмарні сервери
Метод збору та обробки інформації з використанням розумного концентратора	MQTT/ CoAP, Wi-Fi, BLE, ZigBee та Z Wave	Інтелектуальний концентратор	Мікросервісна хмарна платформа
Метод збору та обробки інформації на основі промислових шин	CANOpen, ControlNet, Modbus	Шлюз	Хмарний сервер

Для збору інформації за допомогою пристроїв ІоМТ існують два основні методи. Прямий метод передбачає безпосереднє з'єднання пристрою ІоМТ з мобільною мережею зв'язку (ММЗ). Кожен пристрій ІоМТ підключається безпосередньо до базової станції мережі 5G. При цьому, забезпечуються: швидка передача даних з мінімальною затримкою та високий рівень надійності і безпеки, оскільки дані передаються напряму без проміжних точок. Разом з тим, присутні недоліки: підвищені вимоги до енергоспоживання пристроїв ІоМТ, оскільки вони повинні підтримувати постійне підключення до базової станції та обмеженість кількості пристроїв, які можуть одночасно підключатися до базової станції.

Метод через проміжну точку збору використовує інтелектуальний концентратор або точку доступу як проміжну точку збору даних від пристроїв ІоМТ. Дані спочатку збираються концентратором, а потім передаються до мобільної мережі зв'язку. При цьому, забезпечуються: зменшення енергоспоживання пристроїв ІоМТ, оскільки вони можуть працювати в режимі з

низьким енергоспоживанням і періодично передавати дані до концентратора та підвищена масштабованість, оскільки один концентратор може обслуговувати велику кількість пристроїв ІоМТ. Разом з тим, до недоліків потрібно віднести: додаткові затримки в передачі даних через необхідність передачі даних від пристроїв до концентратора, а потім до базової станції та можливі проблеми з надійністю і безпекою, оскільки дані проходять через додаткову точку збору. У табл. 3. представлено порівняння методів проектування мереж ІоМТ [5].

Вказані методи можуть бути застосовані в залежності від конкретних вимог та умов експлуатації пристроїв ІоМТ, таких як необхідний рівень енергоспоживання, допустима затримка передачі даних та вимоги до надійності та безпеки.

Таблиця 3. Порівняння методів проектування мереж ІоМТ

Параметр	Wi-Fi (через точку доступу)	NB-IoMT (прямий зв'язок)
Енергоспоживання	Низьке (режим очікування)	Високе (постійне підключення)
Затримка передачі	Вища (через проміжну точку)	Мінімальна
Надійність	Залежить від рівня сигналу та інтерференції	Висока
Масштабованість	Висока, легко додавати нові пристрої	Обмежена кількість підключень
Безпека	Потребує додаткових заходів (шифрування, аутентифікація)	Висока

Прикладом взаємодії у вигляді прямого зв'язку є функціонування NB-IoMT (Narrowband Internet of Medical Things) в мережі стандарту 5G. Ця технологія дозволяє отримати доступ до мережевих послуг через E-UTRA (Evolved Universal Terrestrial Radio Access) з пропускнуою здатністю каналу, обмеженою 200 кГц. NB-IoMT особливо ефективна для медичних застосувань, де важливі такі параметри: тривала робота без підзарядки; низька затримка передачі; безпека даних (табл. 4).

Таблиця 4. Порівняння NB-IoMT з іншими технологіями

Технологія	Пропускна здатність	Енергоспоживання	Затримка передачі	Надійність та безпека
NB-IoMT	200 кГц	Низьке	Мінімальна	Висока
LTE-M	до 1 МГц	Середнє	Низька	Висока
Wi-Fi	Висока	Високе	Середня	Середня
Bluetooth	Середня	Низьке	Низька	Середня

NB-IoMT є перспективною технологією для впровадження в системах Інтернету медичних речей, забезпечуючи надійний і ефективний зв'язок в мережі 5G [6]. Використання Wi-Fi з проміжними точками доступу для підключення пристроїв ІоМТ до мережі є ефективним методом організації взаємодії. Цей підхід дозволяє забезпечити необхідний рівень підключення та передачі даних, враховуючи енергоспоживання і масштабованість мережі.

Система стільникового зв'язку, як і будь-яка система телефонного зв'язку, є прикладом системи масового обслуговування. У таких системах існує випадковий потік заявок (викликів), випадкова тривалість їх обслуговування (сеансів зв'язку) і кінцеве число каналів обслуговування (фізичних каналів). Основні характеристики і вимоги до якості обслуговування (QoS) в таких системах залежать від типу застосування. Для визначення та вимірювання якості обслуговування використовуються кілька ключових параметрів, які можна розділити на три основні групи: швидкісні показники (параметри пропускнуої здатності); часові показники (параметри затримок передачі пакетів); показники надійності передачі.

Вимірювання зазначених параметрів здійснюється на певному інтервалі часу. Чим менше цей часовий інтервал, тим жорсткіші вимоги пред'являються до мережі. Забезпечення QoS «із кінця в кінець» вимагає взаємодії всіх вузлів на шляху пакетів трафіку і визначається надійністю,

функціональністю та продуктивністю «слабкої ланки». Параметри якості обслуговування є критичними для забезпечення належного функціонування стільникових мереж. Вони повинні бути ретельно виміряні та підтримані, щоб гарантувати надійність, функціональність і продуктивність мережі. Оскільки якість обслуговування залежить від найслабшої ланки в мережі, всі елементи мережі повинні працювати злагоджено та ефективно для забезпечення високого рівня QoS [7].

Методологія надання якісних сервісів IoT в мережі 5G складається з набору алгоритмів та математичної моделі, які забезпечують адаптивне керування обслуговуванням агрегованого трафіку. Цей трафік включає як мультимедійний трафік з різними пріоритетами, так і трафік даних від пристроїв IoT з власними пріоритетами. Основні компоненти методології: алгоритм пріоритетного обслуговування пакетів; оцінка критичного рівня часу затримки буферизації; буферні ресурси і лічильники часу затримки. Алгоритм пріоритетного обслуговування передбачає: отримання вхідних потоків даних від пристроїв IoT з численними пріоритетами; обробку даних; обслуговування. Розглянута методологія надання якісних сервісів IoT в мережі 5G забезпечує оптимальне обслуговування агрегованого трафіку, враховуючи різні пріоритети мультимедійних і IoT-потоків. Використання алгоритмів пріоритетного обслуговування і динамічної модифікації поля DSCP дозволяє ефективно керувати часом затримки і якістю обслуговування, що є критично важливим для надійної та ефективної роботи медичних пристроїв у мережі 5G [8]. У зв'язку з тим, що пристрої IoT є продовженням концепції M2M (Machine-to-Machine), для забезпечення якості обслуговування (QoS) для IoT-пристроїв можна застосувати класи пріоритетів, визначені для M2M-пристроїв. Для кодування чотирьох класів IoT-пристроїв достатньо двох бітів в полі заголовка IP-пакету. Класифікацію IoT-пристроїв потрібно здійснювати за класами пріоритетів:

- Клас 0: Найвищий пріоритет для критичних медичних додатків, які вимагають мінімальної затримки;

- Клас 1: Високий пріоритет для додатків, що потребують низької затримки, але не настільки критичних як Клас 0;

- Клас 2: Середній пріоритет для додатків з помірною вимогою до затримки;

- Клас 3: Низький пріоритет для додатків, що можуть використовувати вищу затримку;

Кожному IoT-пристрою заздалегідь присвоюється певний пріоритет залежно від його призначення. Всі повідомлення, які надсилає цей IoT-пристрій, матимуть визначений пріоритет. Для кодування чотирьох класів пріоритетів використовується два біти в полі заголовка IP-пакету. Основним параметром QoS для всіх класів є затримка, яка контролюється за допомогою окремого поля заголовку IP-пакету «Час в мережі». Якщо затримка перевищує допустимі межі для визначеного пріоритету, пакет обслуговується з вищим пріоритетом.

До переваг розглянутої методології потрібно віднести:

- гарантоване виконання параметрів QoS для IoT-пакетів з урахуванням їх пріоритетів;

- можливість динамічного управління пріоритетами для забезпечення належного рівня обслуговування;

- зменшення перевантаження базових станцій за рахунок використання пріоритетів і динамічне коригування затримок дозволяє зменшити навантаження на базові станції при плануванні радіоресурсів;

- ефективне використання наявних ресурсів для обслуговування агрегованого трафіку;

- підвищення продуктивності мережі за рахунок адаптивного управління трафіком [9].

Отже, розглянута методологія передбачає високу якість обслуговування для IoT-пристроїв в мережі 5G, використовуючи класи пріоритетів, визначені для M2M-пристроїв. Динамічне управління пріоритетами і адаптивне коригування затримок дозволяють оптимізувати роботу мережі і забезпечити надійне обслуговування критичних медичних додатків. Наведемо порівняльну таблицю (табл. 5) класів якості для сервісів M2M/IoMT пристроїв, яка відображає різні параметри якості обслуговування (QoS) для кожного класу [10].

Таблиця 5. Порівняння NB-IoMT з іншими технологіями

Клас	Тип сервісу	Затримка	Джитер	Пропускна здатність	Надійність	Приклади використання
Клас 0 (Найвищий пріоритет)	Критичні медичні додатки	< 10 мс	Мінімальний	Висока	Максимальна, втрата пакетів неприпустима	Термінові медичні сигнали, дистанційні хірургічні роботи

Клас 1 (Високий пріоритет)	Важливі медичні додатки	< 50 мс	Низький	Помірна	Висока, деяка втрата пакетів допустима	Моніторинг пацієнтів у лікарні
Клас 2 (Середній пріоритет)	Звичайні медичні додатки	< 100 мс	Допустимий	Середня	Середня, деяка втрата пакетів допустима	Передача даних зі смарт-годинників, фітнес-трекерів
Клас 3 (Низький пріоритет)	Некритичні медичні додатки	< 500 мс	Допустимий	Низька	Звичайна, втрата пакетів допустима	Періодичний збір даних для досліджень, передача інформації з менш критичних сенсорів

Таблиця 6 допомагає зрозуміти різні вимоги до якості обслуговування для різних класів M2M/ІоМТ пристроїв, що дозволяє ефективно планувати і керувати ресурсами мережі для забезпечення необхідного рівня QoS. Пристрої тактильного інтернету (ТІ) серед ІоМТ-пристроїв мають найжорсткіші вимоги щодо якості обслуговування (QoS). Моделювання показує, що з середнім завантаженням обладнання мережі 5G обслуговування ІоМТ-пристроїв загальним порядком призводить до значних черг, унеможливаючи забезпечення необхідних показників якості. Тому частину обробки запитів слід здійснювати в ІоМТ-мережі до передачі в мережу 5G [11]. Для вирішення цієї проблеми необхідно використовувати відповідні класи якості для різних типів трафіку, враховуючи їх специфічні вимоги до QoS. Порівняльну таблицю класів якості для сервісів M2M/ІоМТ та ТІ пристроїв наведено нижче.

Таблиця 6. Порівняльня класів якості для сервісів M2M/ІоМТ та ТІ пристроїв

Клас	Тип сервісу	Затримка	Джитер	Пропускна здатність	Надійність	Приклади використання
Клас 0 (Найвищий пріоритет)	Критичні медичні додатки, тактильний інтернет (ТІ)	< 1 мс	Мінімальний	Висока	Максимальна, втрата пакетів неприпустима	Хірургічні роботи з дистанційним управлінням, критичні медичні сигнали
Клас 1 (Високий пріоритет)	Важливі медичні додатки	< 10 мс	Низький	Помірна	Висока, деяка втрата пакетів допустима	Моніторинг пацієнтів у лікарні
Клас 2 (Середній пріоритет)	Звичайні медичні додатки	< 100 мс	Допустимий	Середня	Середня, деяка втрата пакетів допустима	Передача даних зі смарт-годинників, фітнес-трекерів
Клас 3 (Низький пріоритет)	Некритичні медичні додатки	< 500 мс	Допустимий	Низька	Звичайна, втрата пакетів допустима	Періодичний збір даних для досліджень, передача інформації з менш критичних сенсорів

Частину обробки запитів ІоМТ слід здійснювати в ІоМТ-мережі до передачі їх в мережу 5G. Це зменшить навантаження на мережу 5G і зменшить затримки. Розподіл ресурсів потрібно здійснювати із використанням технологій SDN та NFV для динамічного розподілу ресурсів, враховуючи специфічні вимоги ІоМТ та ТІ. Розглянута методологія надання якісних сервісів для ІоМТ та ТІ в мережі 5G забезпечує ефективне управління трафіком, враховуючи специфічні вимоги до QoS для різних типів пристроїв. Використання класифікації за пріоритетами і динамічне управління ресурсами допомагає досягти високого рівня обслуговування навіть при середньому завантаженні мережі.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Медичні пристрої та додатки вимагають найвищих стандартів якості обслуговування (QoS) через критичну важливість точних і своєчасних даних для забезпечення безпеки пацієнтів і ефективності медичних послуг. Дослідження показують, що специфічні вимоги до QoS для таких додатків включають мінімальну затримку, низький джитер, високу пропускну здатність і максимальну надійність. Застосування класів якості для медичних пристроїв і додатків дозволяє ефективно керувати мережевими ресурсами і забезпечувати необхідний рівень обслуговування. Запропонована класифікація охоплює чотири основні класи. Використання динамічних алгоритмів управління ресурсами, таких як програмно-конфігуровані мережі (SDN) і віртуалізація мережевих функцій (NFV), дозволяє ефективно розподіляти ресурси мережі залежно від поточного навантаження і вимог QoS. Це забезпечує гнучкість і адаптивність мережі до змінних умов експлуатації. Тактильний інтернет (ТІ) накладає особливо жорсткі вимоги до QoS через необхідність мінімальної затримки (менше 1 мс) і максимальної надійності. Обслуговування ТІ-трафіку вимагає найвищого пріоритету і може впливати на якість обслуговування інших мультисервісних потоків. Запропоноване рішення включає попередню обробку запитів в ІоМТ-мережі перед передачею в мережу 5G для зменшення навантаження на базові станції.

Результати дослідження показують, що середнє завантаження мережі 5G може призвести до значних черг для запитів від ІоМТ-пристроїв при загальному порядку обслуговування. Тому частина обробки повинна здійснюватися в ІоМТ-мережі, а динамічне управління пріоритетами на основі поточного стану мережі є критично важливим для забезпечення належного рівня QoS. Розглянута методологія і результати дослідження підтверджують важливість класифікації трафіку, динамічного управління ресурсами і пріоритетного обслуговування для забезпечення високої якості обслуговування медичних пристроїв і додатків в мережах 5G. Використання сучасних мережевих технологій, таких як SDN і NFV, дозволяє досягти необхідного рівня QoS і забезпечити надійне та ефективне функціонування систем охорони здоров'я.

Список бібліографічного опису

1. Awotunde, J. B., Bhoi, A. K., & Barsocchi, P. (2021). Hybrid cloud/fog environment for healthcare: An exploratory study, opportunities, challenges, and future prospects. *Hybrid Artificial Intelligence and IoT in Healthcare* (pp. 1-20). Singapore: Springer.
2. Amin, S. U., & Hossain, M. S. (2021). Edge intelligence and Internet of Things in healthcare: A survey. *IEEE Access*, 9, 45-59. Available from <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3045115>.
3. Ding, Y., et al. (2021). DeepEDN: A deep-learning-based image encryption and decryption network for Internet of Medical Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(3), 1504-1518. Available from <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3012452>.
4. Irum, F., Ali, M., Naeem, M., Anpalagan, A., Qaisar, S., & Qamar, F. (2021). D2D-enabled resource management in secrecy-ensured 5G and beyond heterogeneous networks. *Physical Communication*, 45, 101275, ISSN 187-4907. Available from <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101275>.
5. Hameed, K., Bajwa, I. S., Sarwar, N., Anwar, W., Mushtaq, Z., & Rashid, T. (2021). Integration of 5G and Block-Chain Technologies in Smart Telemedicine Using IoT. *Journal of Healthcare Engineering*, 2021.
6. Singh, P., Singh, N., Singh, K. K., & Singh, A. (2021). Diagnosing of disease using machine learning. In. *Machine Learning and the Internet of Medical Things in Healthcare* (pp. 89-111). Academic Press.
7. Adeniyi, E. A., Ogundokun, R. O., & Awotunde, J. B. (2021). IoMT-based wearable body sensors network healthcare monitoring system. *IoT in healthcare and ambient assisted living* (pp. 103-121). Singapore: Springer.
8. Marques, G., Bhoi, A. K., Albuquerque, V. H. C. d., & Hareesha, K. S. (Eds.), (2021). *IoT in healthcare and ambient assisted living*. Springer.
9. Oniani, S., Marques, G., Barnovi, S., Pires, I. M., & Bhoi, A. K. (2021). Artificial intelligence for Internet of Things and enhanced medical systems. *Bio-inspired neurocomputing* (pp. 43-59). Singapore: Springer.
10. Bhoi, A. K., Mallick, P. K., Liu, C. M., & Balas, V. E. (Eds.), (2021). *Bio-inspired neurocomputing*. Springer.
11. М. Васильківський, О. Городецька, Б. Климчук, і В. Говорун, «Стратегії технологічного розвитку апаратного забезпечення інфокомунікаційних радіомереж», ІТКІ, вип. 56, вип. 1, с. 83–91, Бер 2023.
12. Васильківський, М., Прикмета, А., Олійник, А., & Нікітович, Д. (2023). Оптимізація інтелектуальних телекомунікаційних мереж. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки*. – 2023. – № 1. (317). – С. 33–41. doi: 10.31891/2307-5732-2023-317-1-33-41

References

1. Awotunde, J. B., Bhoi, A. K., & Barsocchi, P. (2021). Hybrid cloud/fog environment for healthcare: An exploratory study, opportunities, challenges, and future prospects. *Hybrid Artificial Intelligence and IoT in Healthcare* (pp. 1-20). Singapore: Springer.
2. Amin, S. U., & Hossain, M. S. (2021). Edge intelligence and Internet of Things in healthcare: A survey. *IEEE Access*, 9, 45-59. Available from <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3045115>.

3. Ding, Y., et al. (2021). DeepEDN: A deep-learning-based image encryption and decryption network for Internet of Medical Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(3), 1504-1518. Available from <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3012452>.
4. Irrum, F., Ali, M., Naeem, M., Anpalagan, A., Qaisar, S., & Qamar, F. (2021). D2D-enabled resource management in secrecy-ensured 5G and beyond heterogeneous networks. *Physical Communication*, 45, 101275, ISSN 187-4907. Available from <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101275>.
5. Hameed, K., Bajwa, I. S., Sarwar, N., Anwar, W., Mushtaq, Z., & Rashid, T. (2021). Integration of 5G and Block-Chain Technologies in Smart Telemedicine Using IoT. *Journal of Healthcare Engineering*, 2021.
6. Singh, P., Singh, N., Singh, K. K., & Singh, A. (2021). Diagnosing of disease using machine learning. In. *Machine Learning and the Internet of Medical Things in Healthcare* (pp. 89-111). Academic Press.
7. Adeniyi, E. A., Ogundokun, R. O., & Awotunde, J. B. (2021). IoMT-based wearable body sensors network healthcare monitoring system. *IoT in healthcare and ambient assisted living* (pp. 103-121). Singapore: Springer.
8. Marques, G., Bhoi, A. K., Albuquerque, V. H. C. d., & Hareesha, K. S. (Eds.), (2021). *IoT in healthcare and ambient assisted living*. Springer.
9. Oniani, S., Marques, G., Barnovi, S., Pires, I. M., & Bhoi, A. K. (2021). Artificial intelligence for Internet of Things and enhanced medical systems. *Bio-inspired neurocomputing* (pp. 43-59). Singapore: Springer.
10. Bhoi, A. K., Mallick, P. K., Liu, C. M., & Balas, V. E. (Eds.), (2021). *Bio-inspired neurocomputing*. Springer.
11. M. Vasykivskyi, O. Horodetska, B. Klymchuk, i V. Hovorun, «Strategii tekhnolohichnoho rozvytku aparatnoho zabezpechennia infokomunikatsiinykh radiomerezh», *ITKI*, vyp. 56, vyp. 1, s. 83–91, Ber 2023. [in Ukrainian].
12. Vasykivskyi, M., Prykmeta, A., Oliinyk, A., & Nikitovych, D. (2023). Optymizatsiia intelektualnykh telekomunikatsiinykh merezh. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, Tekhnichni nauky*. – 2023. – № 1. (317). – S. 33–41. doi: 10.31891/2307-5732-2023-317-1-33-41 [in Ukrainian].