

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/07>

Бешлей М.І.

Національний університет «Львівська політехніка»

Прислупський А.І.

Національний університет «Львівська політехніка»

Бешлей Г.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

МЕТОДИ РОЗПОДІЛУ РАДІОРЕСУРСІВ ТА БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В МЕРЕЖІ 5G / NB-IOT ДЛЯ НАДАННЯ КРИТИЧНО ВАЖЛИВИХ СЕРВІСІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Очікується, що 5G стане ключовим фактором нової хвилі розвитку систем Інтернету речей (IoT, Internet of things), а саме в збільшенні числа підключених розумних пристроїв і поліпшенні архітектури платформ. Нині технологія вузькосмугового Інтернету речей (NB-IoT, Narrowband Internet of Things) розрекламована як найкращий варіант зі співвідношення можливостей і вартості розгортання, оскільки для мережі не потрібен мережевий шлюз. Інші варіанти інфраструктури вимагають наявності шлюзів для збору даних із пристроїв і потім передавання їх до головного сервера. Не дивлячись на ряд істотних переваг використання технології NB-IoT у теперішніх 4G мережах, недоліком є те, що вона не придатна для критично важливих сервісів IoT, які вимагають забезпечення ультра надійного зв'язку з наднизькими затримками. Незважаючи на те, що стандарт NB-IoT досі перебуває на стадії тестування та вдосконалення, за технологією – велике майбутнє, оскільки саме вона повинна стати однією зі складових частин специфікації 5G-мереж для критично важливих сервісів IoT.

Саме тому в роботі запропоновано архітектуру мережі мобільного зв'язку 5G для надання критично-важливих сервісів Інтернету речей (IoT, Internet of things) шляхом виділення вузькосмугового спектра й перенесення частини функцій із базової станції eNodeB на контролер IoT. Розроблено метод пріоритетизації IoT трафіку для забезпечення якості обслуговування (QoS, Quality of service) у гетерогенній 5G / NB-IoT мережі. Запропоновано метод розподілу радіоресурсів у каналі зв'язку NB-IoT із метою забезпечення якості обслуговування з кінця в кінець. Розроблено алгоритми управління «розумною чергою» на основі методів пріоритетизації IoT трафіку й балансування навантаження в мережах 5G. Запропоновано метод балансування навантаження з урахуванням пріоритетів даних на основі зібраної статистики системи моніторингу ресурсів мережі LTE/IoT. Суть методу полягає в забезпеченні якості обслуговування пріоритетного трафіку IoT в умовах недостатності необхідних частотно-часових ресурсів у межах основної комірки обслуговування. Доведено, що комплексне використання розроблених методів пріоритетизації IoT трафіку й балансування навантаження дають змогу зменшити середню затримку передавання повідомлень реального часу з кінця в кінець до 3 разів, водночас роблячи систему NB-IoT придатною для забезпечення ультра надійного зв'язку з низькими затримками, що є важливим для розвитку мереж 5G.

Ключові слова: Інтернет речей, вузькосмуговий Інтернет речей, якість обслуговування, критично важливі сервіси 5G, балансування навантаження.

Постановка проблеми. Пандемія, яка сколихнула світ, наочно продемонструвала бізнесу, наскільки важливо мати рішення, які допомагають зменшити витрати, дозволяють працівникам працювати віддалено, замінювати ручну працю тощо. Багато таких ноу-хау пов'язані з викорис-

танням Інтернету речей (IoT). NB-IoT – це вузькосмугова безпроводна технологія Інтернету речей, яка надає користувачам великий набір інструментів для оптимізації бізнес-процесів, зменшення експлуатаційних витрат за допомогою віддаленого моніторингу різних пристроїв. Проект

партнерства третього покоління (3GPP), який визначає стандарти 5G, зазначив, що NB-IoT буде частиною мереж 5G для масового розгортання сервісів Інтернету речей у найближчому майбутньому, проте з деякими відмінностями від сучасної технології NB-IoT, яка успішно розгортається в нинішніх мережах LTE 4G [1]. Це пов'язано з тим, що традиційна технологія NB-IoT / LTE не в змозі забезпечити вимоги щодо надійності чи затримки передавання даних для критичних IoT сервісів. Не дивлячись на те, що більшість нинішніх сервісів IoT не покладають таких вимог, проте в ближчому майбутньому такі сервіси, як тактильний та індустріальний Інтернет речей, зобов'язують затримку з кінця в кінець величиною в 10 мс, що своєю чергою є найскладнішим завданням з боку розгортання IoT у мережах 5G [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [3] основна увага приділяється побудові імітаційної моделі NB-IoT на основі OPNET і тестуванню її характеристик в умовах високого навантаження на канали. Автори головним чином розглядають розробку й впровадження існуючої технології NB-IoT із боку характеристик фізичного рівня NB-IoT на основі LTE. Результати моделювання підтвердили продуктивність NB-IoT, де затримка висхідної лінії зв'язку менша за 10 с, використання каналу вище, ніж у мережі LTE, а зону покриття більшу, ніж у мережі LTE. Також показано, що NB-IoT у нинішньому вигляді не може використовуватися для критично важливих Інтернет-додатків через обмеження якості обслуговування. Якщо потрібно впровадити NB-IoT на основі мереж доступу LTE для критичних сервісів, потрібна модернізація NB-IoT.

Автори [4] систематично вимірюють фізичний рівень, а також перевіряють ефективність прикладного рівня. Особлива увага приділяється впливу радіопараметрів на прикладний рівень якості обслуговування. Робота досліджує послуги в режимі нереального часу через те, що існуюча технологія NB-IoT не підходить для критично важливих сервісів, які зобов'язують низьку затримку, і вимагає вдосконалення технології NB-IoT.

Нещодавно Чен і співавтори в [5] запропонували рішення щодо управління якістю послуг для IoT. Зокрема, автори вдосконалили алгоритм k-means для кластеризації пристроїв NB-IoT і встановлення пріоритету кластеру. Згідно з пріоритетами планувальник базової станції розподіляє сервіси IoT для завдань очікування в черзі. Недоліком такого рішення є складність реалізації в реальній мережі, оскільки такий підхід вимагає повного оновлення

планувальника програмних ресурсів на базовій станції. Неясно, як таке рішення вплине на роботу всієї мобільної мережі 5G.

Постановка завдання. В умовах поступового впровадження сервісів IoT на мережі оператора мобільного зв'язку однією з основних задач є адаптування якості сервісу (QoS) згідно з вимогами конкретного класу сервісу. Таким чином, механізми пріоритезації трафіку в мережах 4-го та 5-го покоління для систем IoT є одним із найважливіших аспектів, від якого надалі буде залежати розвиток Інтернету речей у світі. Одним з ефективних шляхів покращення основних параметрів якості обслуговування (QoS) в мережах 4G / 5G, що базуються на технології LTE, є застосування принципів оптимального розподілу мережевих ресурсів. Функції розподілу мережевих ресурсів у технології LTE покладені на систему управління радіоресурсами (RRM, Radio Resource Management) [6], а саме на планувальника (scheduler), відповідального за проектування ресурсів для станцій користувачів (UE, Users Equipment) і пристроїв IoT. До таких ресурсів насамперед належать символи (часовий ресурс) і частотні піднесучі (частотний ресурс). Найменшою структурною одиницею радіоресурсу, яку можна виділити тій чи іншій станції користувача, є ресурсний блок (RB, Resource Block) [7]. Необхідно зауважити, що рішення RRM про виділення мережевих ресурсів передусім ґрунтується на вимогах до QoS, а під час впровадження сервісів IoT з'являється необхідність у нових механізмах пріоритезації трафіку й управління якістю обслуговування в мережах 4G / 5G для забезпечення гарантованого QoS.

Метою роботи є забезпечення гарантованої якості обслуговування сервісів IoT шляхом розроблення методів управління якістю обслуговування з кінця в кінець, а саме методів пріоритезації трафіку, формування вузькосмугового NB-IoT каналу й розподілу його ресурсів у мережах 4G / 5G.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Метод розподілу радіоресурсів у мережах 4G / 5G для надання критично важливих сервісів IoT у вузькосмуговому спектрі.

З розвитком сервісів IoT однією з основних задач є адаптування QoS згідно з вимогами конкретного виду сервісу. Таким чином, механізми пріоритезації трафіку в мережах 5G для систем IoT є одним із найважливіших аспектів, від якого надалі буде залежати розвиток Інтернету речей у світі.

У роботі вперше розроблено метод розподілу частотно-часових ресурсів низхідного

й висхідного каналу зв'язку гетерогенної мережі LTE / NB-IoT, який на відміну від відомих урахує вимоги щодо рівня якості надання критично-важливих сервісів Інтернету речей і проводить адаптивне інтелектуальне планування процесом виділення радіоресурсів на основі аналізу пріоритетності даних, зокрема у вузькосмуговому NB-IoT спектрі, що дало змогу забезпечити необхідну якість обслуговування з кінця в кінець.

Визначення класу, до якого належить той чи інший трафік UE, пропонуємо проводити на основі параметру QCI (QoS Class Identifier). Параметр QCI може приймати один із дев'яти станів, кожен з яких, відповідно, асоціюється з певним видом сервісу, а отже, і з видом каналу передачі, швидкістю, коефіцієнтом помилок і затримкою. QCI є міткою в пакеті IPv6 «ID каналу». Для сервісів IoT запропоновано метод пріоритезації трафіку, який базується на основі критерію допустимих затримок і середньої кількості відмов в обслуговуванні. Згідно з роботою [8], авторами запропоновано 4 класи (L1, L2, L3 та L4) сервісів IoT із різними вимогами до QoS. QCI_{IoT} є міткою в пакеті IPv6, значення якої записується в полі ToS. Зокрема, критично важливими сервісами IoT є L1 та L2 класи.

На рис. 1 показано процедуру оптимального використання схеми модуляції та кодування для забезпечення QoS на фізичному рівні в мережі NB-IoT / 5G, після чого механізм планування пропускної здатності використовується LTE та IoT планувальниками для виділення UE та IoT пристрою ресурсу для забезпечення QoS.

Найменшим елементом у частотно-часовій області кадру IoT є ресурсний блок, який складається з 12 згрупованих частотних піднесучих. Ресурсний блок займає 180 кГц у частотній і 0,5 мс у часовій області. Конфігурацію RB у частотно-часовій області ілюструє рис. 2. Кількість піднесучих OFDM або SC-FDMA символів в одному ресурсному блоці залежить від відстані між піднесучими, а також від значення циклічного префікса (CP, Cyclic Prefix).

Таким чином, запропоновано розподіляти ресурси в низхідному й висхідному каналах IoT, використовуючи запропоновані алгоритми управління «розумною чергою», зокрема алгоритм для каналу вниз показаний на рис. 2.

Детальний принцип роботи алгоритмів управління чергою розглядається далі. Для цього в роботі здійснено модифікацію логічних каналів управління з метою гнучкого управління QoS на каналному рівні. Зокрема, додатково введено нові

Таблиця 1

Характеристики QCI_{IoT}

QCI _{IoT}	Тип	Пріоритет	Допустима затримка T, мс	Допустимі відмови в обслуговуванні, P _v %	Клас IoT
1	Гарантований час передавання даних (GBR _{IoT}), трафік реального часу	1	10	0,01	L1
2		2	20	0,1	L2
3	Гарантований час передавання даних (GBR _{IoT}), трафік нереального часу	3	1000	5	L3
4	Негарантований час передавання даних (Non-GBR _{IoT})	4	t _{невизначене}	P _{невизначене}	L4

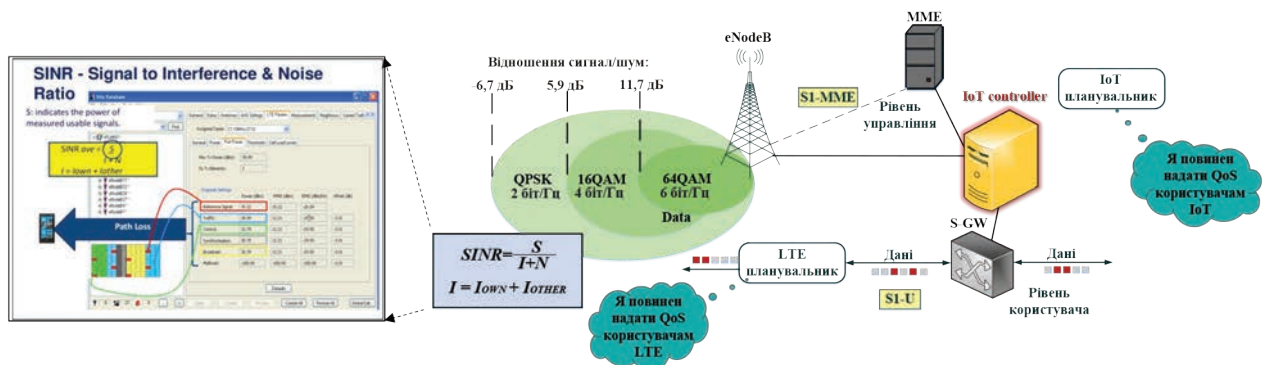


Рис. 1. Процес розподілу ресурсів у пропонуваній мережі 5G / NB-IoT

канали, які передають сигнальну інформацію про блок ресурсів для конкретного сенсора IoT із його пріоритетом та унікальним ідентифікатором пристрою. На відміну від відомих рішень, ці канали дають змогу виділити один ресурсний блок для передавання невеликого повідомлення від датчика IoT і забезпечити мінімальну затримку 0,5 мс у кадрі. Ці затримки особливо важливі для тактичних даних IoT у реальному часі, які забезпечити в традиційній NB-IoT неможливо. У роботі проведено модифікацію для контрольних каналів, які складаються з LTE PDCCN, каналів опорних сигналів, специфічних для комірок LTE, і інтелектуальних каналів управління узгодженості черг на контролері IoT, що взаємодіють із кінцевим пристроєм IoT. Канал управління також передає інформацію контролеру про використання ресурсів. Ці канали управління пропонуються для гнучкості управління QoS на рівні зв'язку, який передає сигналізаційну інформацію про блок ресурсів для конкретного повідомлення датчика IoT із його пріоритетом та унікальним ідентифікатором пристрою.

Метод балансування навантаження в мережі 4G / 5G для забезпечення сервісам IoT ультра-надійного зв'язку з низькими затримками.

Одним зі способів, пропорованих у роботі, є забезпечення необхідної якості обслуговування на

основі використання засобів моніторингу мережі. Використання централізованого моніторингу дає змогу визначити пріоритетні напрями розвитку цілої мережі. Визначивши стан мережі рівня радіодоступу, можна знайти й передбачити вузькі місця під час обслуговування користувачів та IoT пристроїв. У роботі запропоновано метод балансування навантаження з урахуванням пріоритетів даних на основі зібраної статистики системи моніторингу ресурсів 5G / NB-IoT. Суть методу полягає в забезпеченні якості обслуговування пріоритетного трафіку IoT в умовах недостатності необхідних частотно-часових ресурсів у межах основної комірки обслуговування.

У такому випадку пропонується за допомогою системи моніторингу ресурсів, за яку відповідає нововведений в архітектуру LTE IoT контролер, перенаправляти трафік IoT реального часу класу L1 на обслуговування альтернативної (додаткової) базової станції eNodeB (рис. 3).

Таким чином, у роботі набув подальшого розвитку метод балансування навантаження в мережі LTE / NB-IoT, який на відміну від відомих в умовах недостатності необхідних ресурсів для обслуговування критично-важливих IoT даних у межах основної базової станції дав змогу на основі розробленої централізованої системи моніторингу частотно-

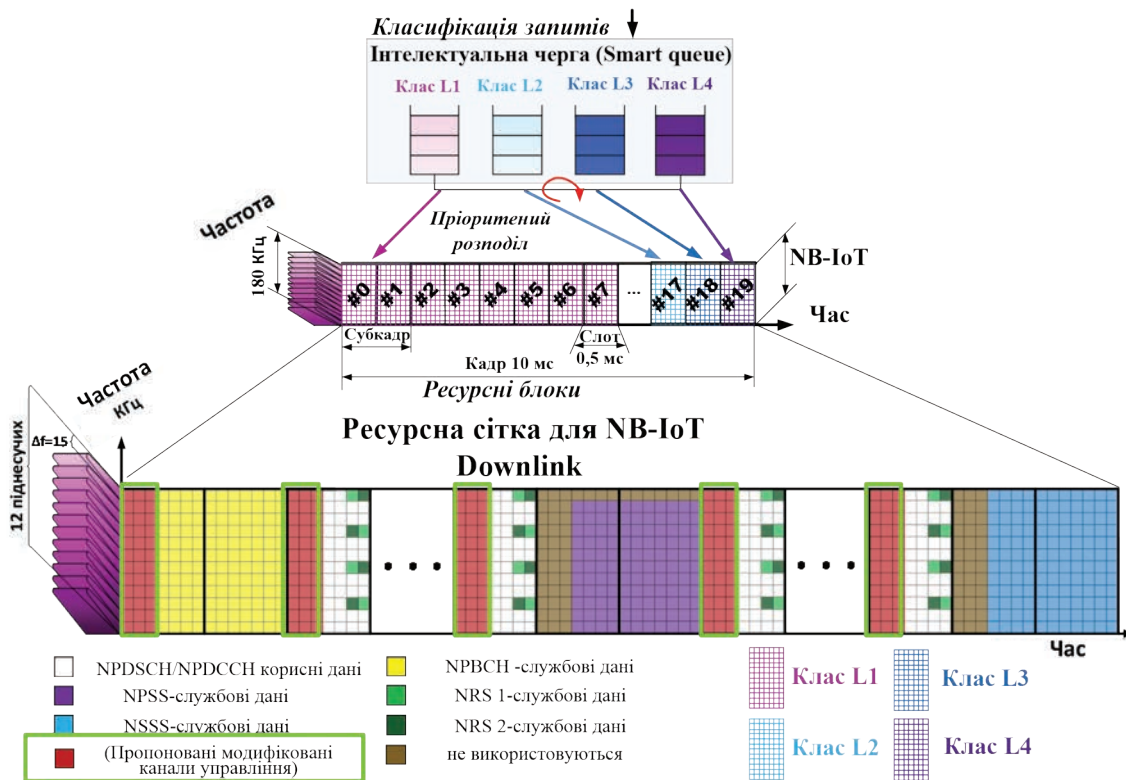


Рис. 2. Ресурсна сітка NB-IoT для низхідного каналу зв'язку

часових ресурсів та аналізу пріоритету забезпечити ультранадійний зв'язок із низькими затримками шляхом перенаправлення на обслуговування менш завантаженої альтернативної базової станції.

Розроблення алгоритмів управління «розумною чергою» на основі методів пріоритизації та балансування IoT трафіку в мережах 4G / 5G.

У роботі запропоновано алгоритми управління «розумною чергою» на основі запропонованого методу пріоритизації та балансування IoT трафіку в гетерогенній мобільній мережі 5G.

Для критично важливого сервісу IoT класу L1.

Під час запуску алгоритму базова станція очікує на запит на передавання даних (блок 1). Після цього проходить аналіз пріоритету пристрою, з якого відбуватиметься передавання. Установлюється, що пріоритет пристрою є L1 (найвищий). Проводиться аналіз черги й ресурсів мережі для здійснення передавання даних (блок 2). Якщо є наявні ресурси, то здійснюється конфігурація базової станції (блок 3) і відправляються сигналізаційні дані й запит на передавання до IoT пристрою (блок 4). Після успішної передачі відбувається збереження статистики (блок 12) для подальшого прогнозування активності IoT пристрою. У протилежному випадку перевіряється можливість звільнення ресурсів шляхом пристроїв класу L3 (блок 7). Якщо можна звільнити ресурси, то IoT device класу L3 відтермінується, черга реорганізовується (блок 8) і можна переходити з блоку 6 у блок 3. Якщо наявних ресурсів недостатньо, відбувається

пошук альтернативних базових станцій (блок 5), в яких є вільні ресурси для передавання даних. Якщо існує така базова станція (блок 6), то резервуються ресурси в спектрі частот для IoT сервісів (блок 7) і конфігурується альтернативна базова станція (блок 8). Відправляються сигналізаційні дані й запит на передавання до IoT пристрою (блок 9). Після успішної передачі відбувається збереження статистики (блок 12). У випадку, якщо ресурсів у спектрі для IoT сервісів на альтернативній базовій станції недостатньо, здійснюється передача обслуговування з'єднання в загальний канал зв'язку (блок 10). Відправляються сигналізаційні дані й запит на передавання до IoT пристрою (блок 11), і він обслуговується як абонент мобільної мережі. Після успішної передачі відбувається збереження статистики (блок 12). Завершується робота алгоритму (блок 13). Блок-схема алгоритму роботи зображена на рис. 4а.

Для критично важливого сервісу IoT класу L2.

Під час запуску алгоритму базова станція eNodeB очікує на запит встановлення з'єднання (блок 1). Після оброблення всіх запитів проводиться аналіз класу пристроїв, які підключилися, і трафіку, який вони будуть передавати. Усі під'єднані пристрої заносяться в чергу відповідно до класів яким вони належать (по пріоритетах). На основі отриманих даних перевіряється доступність ресурсів для передавання трафіку від пристроїв класу L2 (блок 2). Якщо ресурсів достатньо, то застосовується алгоритм для L1 (блок 3).

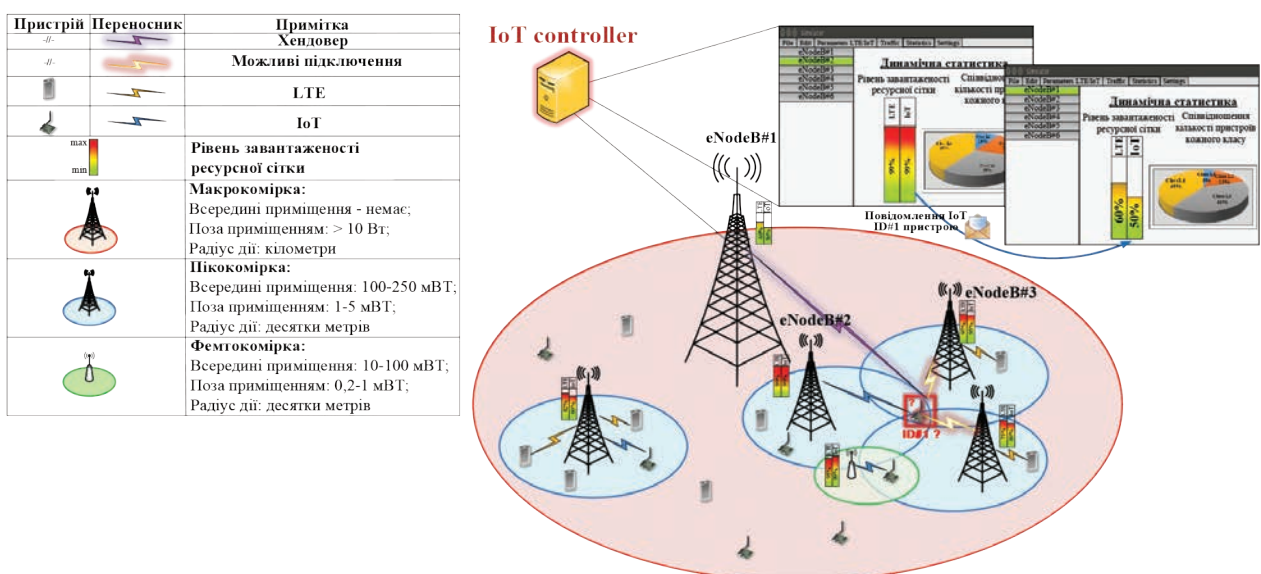


Рис. 3. Принцип роботи методу балансування навантаження з урахуванням пріоритетів даних на основі зібраної статистики системи моніторингу ресурсів LTE / IoT

Якщо ресурсів не вистачає, то аналізується черга й визначається час відтермінування передавання (блок 4). Перевіряється доступність ресурсів у межах допустимої затримки для класу (блок 5). У випадку доступності ресурсів для передавання трафіку впродовж допустимого часу затримки вносимо IoT пристрій у чергу й переходимо до алгоритму для L1 (блок 6→3). У протилежному випадку перевіряється можливість звільнення ресурсів шляхом пристроїв класу L3 (блок 7). Якщо можна звільнити ресурси, то IoT пристрій класу L3 відтермінується, черга реорганізується (блок 8) і можна перейти з блоку 6 у блок 3. Якщо ресурси неможливо звільнити, то проводиться пошук альтернативних базових станцій (блок 9). Далі виконується перевірка того, чи можна здійснити передавання трафіку в межах допустимої затримки в разі використання альтернативної базової станції (блок 10). Якщо можна, то відбувається резервування ресурсів на альтернативній базовій станції та конфігурація альтернативної базової станції (блок 11–12). Після

цього відбувається налаштування IoT пристроїв для роботи з альтернативною базовою станцією (блок 13). Далі відбувається збереження статистики для подальшого прогнозування (блок 14). Якщо не можна, то у власній черзі резервується доступний ресурс (блок 15). Далі конфігурується базова станція (блок 16), а також IoT пристрій для передавання через деякий час (блок 17). Далі відбувається збереження статистики для подальшого прогнозування (блок 14). Наприкінці відбувається повернення на початок алгоритму (блок 18). Блок-схема алгоритму роботи зображена на рис. 4б.

Моделювання та дослідження ефективності запропонованих рішень на основі розробленої імітаційної моделі мережі LTE / NB-IoT.

Для дослідження ефективності запропонованих рішень розроблено імітаційну модель гетерогенної мобільної мережі LTE/NB-IoT. Така модель реалізована у вигляді java симулятора дискретних подій, для цього використано Discrete-Event Simulation and Modelling in Java DESMO-J (DESMO-J), що містить такі функціональні кла-

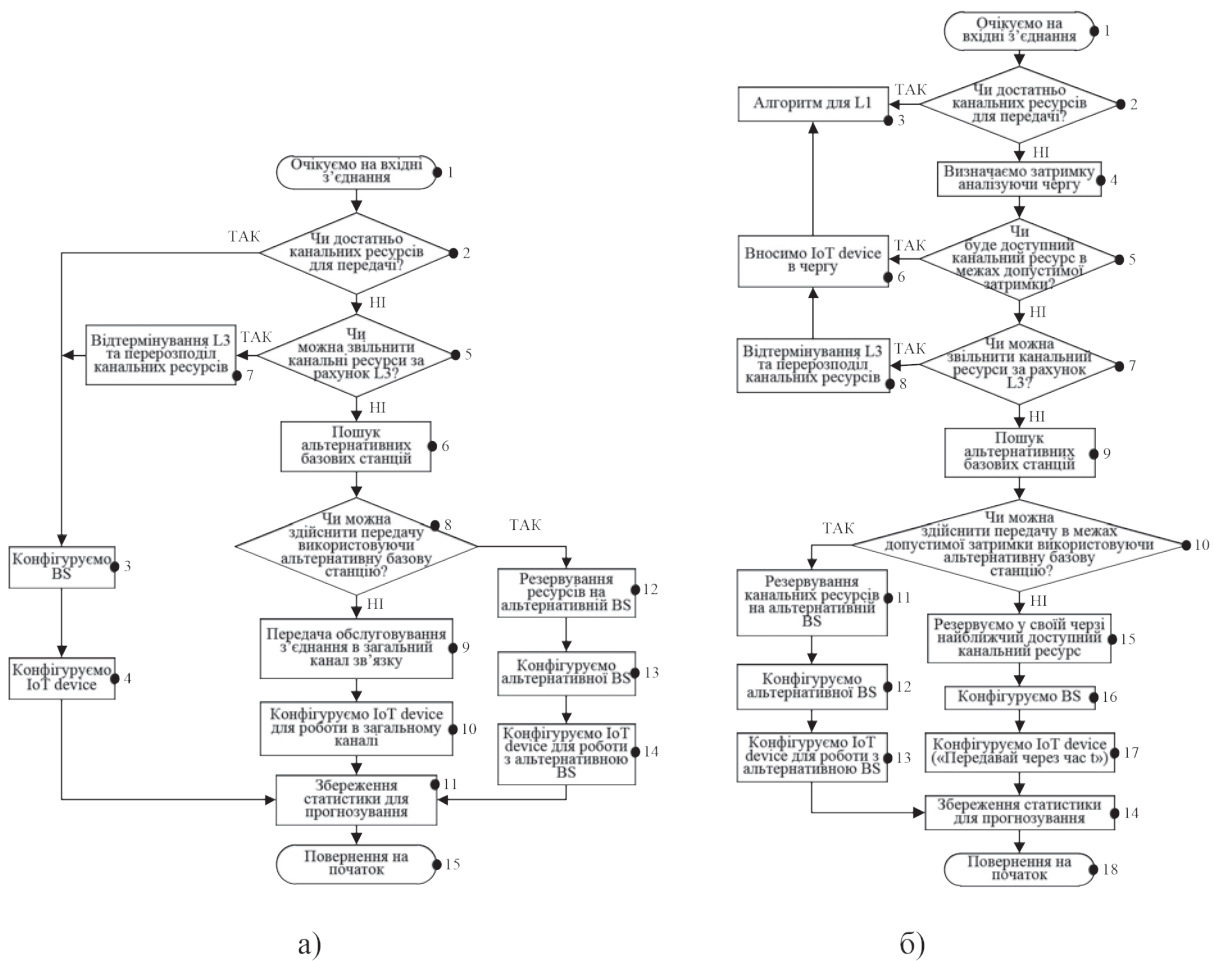


Рис. 4. Блок-схема алгоритму управління «розумною чергою» для класу L1 – а) та L2 – б)

сові блоки, як черги, генерація випадкових чисел і різних статистичних розподілів.

Спрощена структурно-функціональна схема моделі зображена на рис. 5, де червоним кольором показано нововведені блоки, реалізовані у вигляді додаткових програмних надбудов.

IBN / IoT контролер забезпечує моніторинг стану каналних ресурсів базових станцій для передавання повідомлень, виділення необхідних каналних ресурсів для конкретних IoT пристроїв, перерозподіл каналних ресурсів між кінцевими пристроями, а також збір, опрацювання та аналіз статистичних даних підключень.

Якщо каналні ресурси забезпечують обслуговування в межах допустимої затримки, то вони закріплюються за IoT пристроєм. IoT контролер відправляє відповідь із номером каналних ресурсів на поточну базову станцію. Базова станція перенаправляє відповідь на IoT пристрій, який аналізує її та очікує на свій каналний ресурс, в якому й буде передавати інформаційне повідомлення через базову станцію на IoT брокер. Останній зберігає інформацію, передану в повідомленні. Якщо немає вільних каналних ресурсів, то запит обслуговується згідно з вищеописаними алгоритмами.

Основні вхідні дані для моделі:

- кількість IoT пристроїв – 2 000;
- кількість ресурсних блоків у вузькосмуговому спектрі – 200 кГц;
- види модуляції – BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM;
- середня довжина повідомлення від IoT пристроїв залежно від обраної модуляції – 10 ресурсних блоків;
- середнє навантаження – ρ_i , де $i = 1,2,3,4,5$ що враховується для контролера IoT, зокрема $\rho_1 = 0.12$, $\rho_2 = 0.18$, $\rho_3 = 0.5$, $\rho_4 = 0.75$, $\rho_5 = 1$;

– співвідношення розподілу IoT пристроїв по класах – $R_L1 = 10\%$, $R_L2 = 20\%$, $R_L3 = 30\%$ та $R_L4 = 40\%$;

– допустимі затримки для кожного класу пристроїв – $D_L1 = 10$ мс, $D_L2 = 20$ мс, $D_L3 = T_{з.допустима}$, $D_L4 = T_{з.допустима}$;

– типи тривалості затримок: поширення сигналу за безпроводним каналом, за часом оброблення сигналу на базовій станції, за провідним середовищем, за часом оброблення IoT контролером, IoT пристроєм і часом очікування передавання даних.

Тривалість передавання даних IoT пристроїв із кінця в кінець визначається за формулою 1.

$$T_{3.E2E} = 3 \cdot t_{\text{пош.сигн.безпров.}} + 3 \cdot t_{\text{обр. BS.}} + 3 \cdot t_{\text{пош.сигн.пров.}} + t_{\text{обр. IoT контрол.}} + t_{\text{обр. IoT пристр.}} + t_{\text{очікув. передаванн}} \quad (1)$$

де $t_{\text{пош.сигн.безпров.}}$ – затримка поширення сигналу за безпроводним каналом; $t_{\text{обр. BS.}}$ – затримка оброблення сигналу на базовій станції; $t_{\text{пош.сигн.пров.}}$ – затримка поширення сигналу за провідним середовищем; $T_{\text{обр. IoT контрол.}}$ – затримка оброблення IoT контролером; $t_{\text{обр. IoT пристр.}}$ – затримка оброблення IoT пристроєм і затримка очікування передавання даних $t_{\text{очікув. передаванн}}$.

Етапи моделювання.

Моделювання проводиться в три етапи:

Перший етап (I) полягає в дослідженні E2E QoS під час обслуговування потоку вхідних запитів за принципами існуючого методу (*Proportional Fair Scheduling*). *Другий етап* (II) полягає в дослідженні E2E QoS під час обслуговування потоку вхідних запитів згідно із запропонованим методом пріоритетизації трафіку IoT (*P.IoT*).

Третій етап (III) полягає в дослідженні E2E QoS під час обслуговування потоку вхідних запитів за одночасної реалізації методів пріоритетизації трафіку (*P.IoT*) і балансування навантаження (*LB.IoT*).

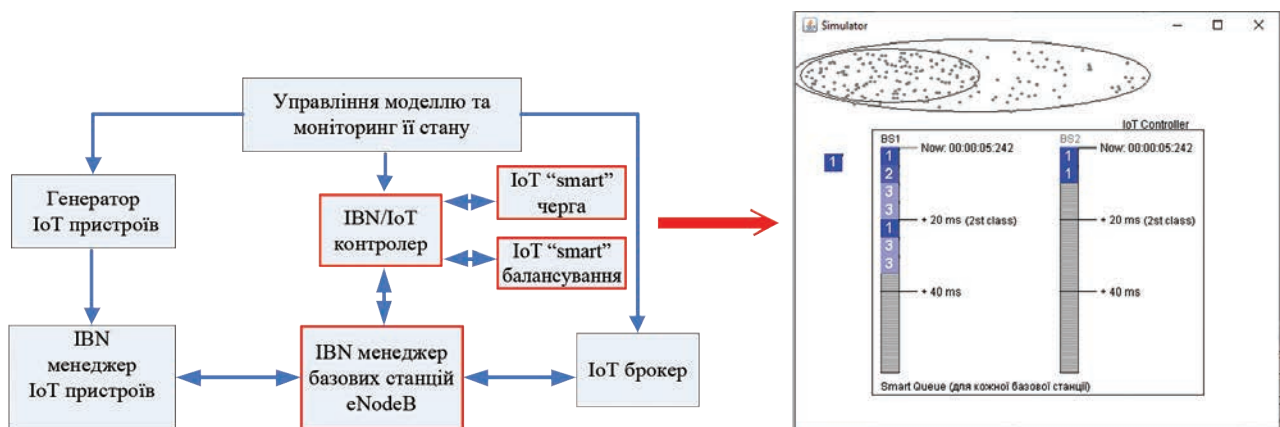


Рис. 5. Структурно-функціональна схема імітаційної моделі мережі 5G / NB-IoT

Одночасна робота методу пріоритизації IoT трафіку й методу балансування навантаження забезпечує зменшення середньої затримки E2E для пристроїв, які передають дані в режимі реального часу (L1, L2), шляхом збільшення середньої затримки передавання для пристроїв, які не чутливі до затримки (L3, L4) (рис. 6а). Відсоток відмов в обслуговуванні для пріоритетних пристроїв у разі застосування запропонованих методів зображений на рис. 6б.

На такому етапі моделювання одночасно працює метод пріоритизації IoT трафіку й метод балансування навантаження. Унаслідок цього в разі перевантаження поточної базової станції частина пріоритетних пристроїв передається на обслуговування іншій базовій станції, як показано на рис. 6в.

На основі імітаційного моделювання встановлено, що методи пріоритизації IoT трафіку й балансування навантаження дають змогу зменшити середню затримку передавання повідомлень реального часу з кінця в кінець на 68,8% у гетерогенній мережі LTE / NB-IoT (рис. 7б). У разі використання механізму пріоритизації зменшується кількість відмов в обслуговуванні на 58% для класу L1 і 76% – для L2 у порівнянні з існуючими методами в умовах високого навантаження (рис. 7в). У випадку одночасного використання запропонованих рішень досягається мінімальна кількість відмов для сервісів IoT класу L1 і L2 в умовах недовантаженості альтернативних базових станцій.

Висновки. Розроблено алгоритми управління «розумною чергою» для розподілу радіоресурсів у вузькосмуговому спектрі 5G мережі на основі методу пріоритизації IoT трафіку. Використання алгоритмів дасть змогу операторам мобільного зв'язку забезпечити необхідний рівень якості обслуговування сервісів IoT у мережах 5G. Запропоновано метод балансування навантаження з урахуванням пріоритетів даних на основі зібраної статистики системи моніторингу ресурсів мережі 5G. Суть методу полягає в забезпеченні якості обслуговування пріоритетного трафіку IoT в умовах недостатності необхідних частотно-часових ресурсів у межах основної комірки обслуговування. На основі отриманих результатів моделювання доведено, що метод балансування навантаження та метод пріоритизації трафіку дають змогу забезпечити якість обслуговування трафіку реального й нереального часу з кінця в кінець, а саме зменшити середню затримку передавання повідомлень реального часу з кінця в кінець на 68,8% у гетерогенній мережі LTE / NB-IoT. Під час використання механізму пріоритизації, зменшується кількість відмов в обслуговуванні на 58% для класу L1 і 76% – для L2 у порівнянні з існуючими методами. В умовах одночасного використання запропонованих рішень досягається мінімальна кількість відмов для сервісів IoT класу L1 і L2 в умовах низького навантаження альтернативних базових станцій.

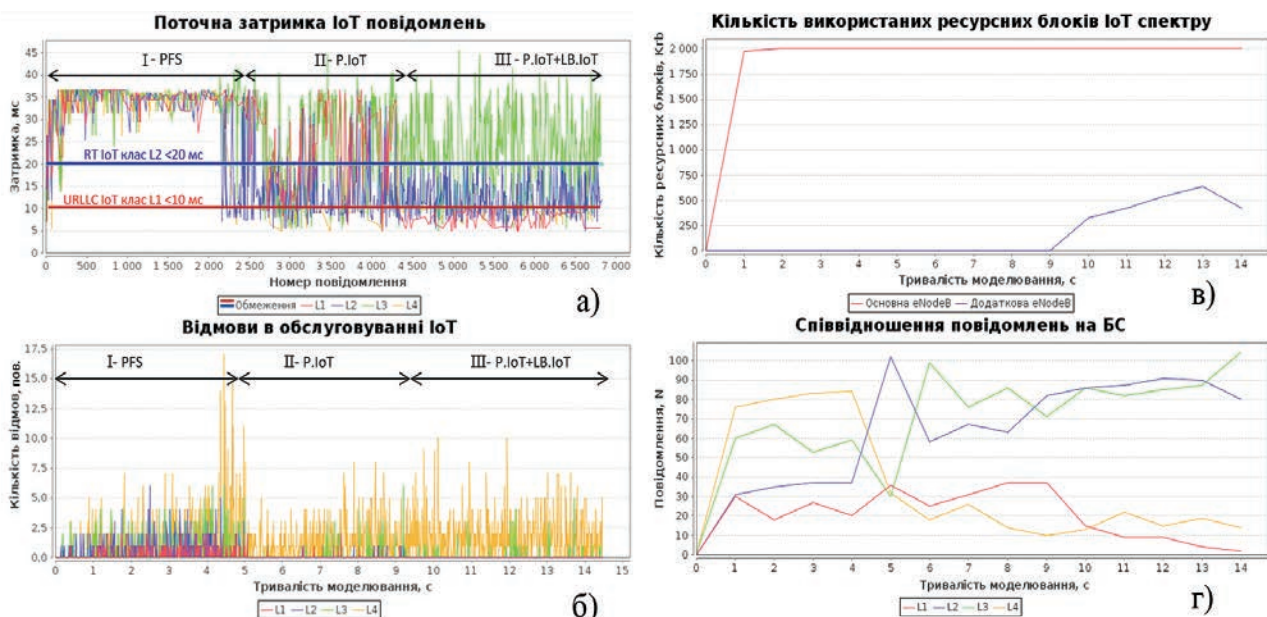


Рис. 6. Поточна затримка в процесі передавання IoT повідомлень – а), кількість відмов – б), кількість використаних ресурсних блоків IoT спектру – в) і співвідношення кількості переданих повідомлень різних пріоритетів – г)

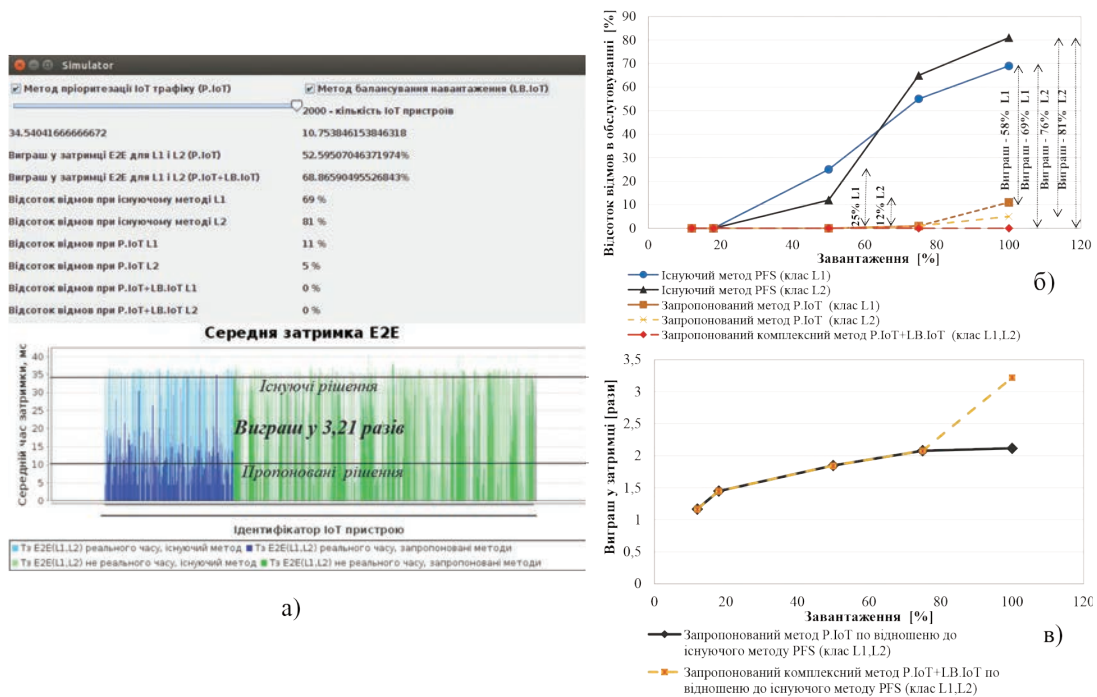


Рис. 7. Графічний інтерфейс імітаційної моделі результатів порівняння ефективності запропонованих рішень – а), оцінка ефективності запропонованих методів у порівнянні з відомим PFS методом за критерієм «відмов в обслуговуванні» для пріоритетних IoT пристроїв (класів L1, L2) – б) і «затримки обслуговування» – в) в умовах різного завантаження IoT контролера

Список літератури:

- Rahimi R., Zibaenejad A., Safavi A. A Novel IoT Architecture based on 5G-IoT and Next Generation Technologies. *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. 2018. P. 81–88.
- Akprakw G.A., Abu-Mahfouz A.M. A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 3619–3647.
- Miao Y., Li W., Tian D., Hossain M.S., Alhamid M.F. Narrowband Internet of Things: Simulation and Modeling. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. Vol. 5. No. 4. P. 2304–2314.
- Matz A.P., Fernandez-Prieto J.-A., Cañada-Bago J., Birkel U. A Systematic Analysis of Narrowband IoT Quality of Service. *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 6. P. 1636–1672.
- Chen X., Li Z., Chen Y., Wang X. Performance Analysis and Uplink Scheduling for QoS-Aware NB-IoT Networks in Mobile Computing. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 44404–44415.
- Гаркуша С.В., Гаркуша О.В. Розробка математичної моделі управління пропускнуою здатністю низхідного каналу зв'язку технології LTE, що використовує перший вид розподілу ресурсів. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Радіоелектроніка та телекомунікації*. 2015. № 818. P. 211–219.
- Kim Y., Park S. Analytical Calculation of Spectrum Requirements for LTE-A Using the Probability Distribution on the Scheduled Resource Blocks. *IEEE Communications Letters*. 2018. Vol. 22. No. 3. P. 602–605.
- Beshley M., Kryvinska N., Seliuchenko M., Beshley H., Shakshuki E., Yasar A. End-to-End QoS “Smart Queue” Management Algorithms and Traffic Prioritization Mechanisms for Narrow-Band Internet of Things Services in 4G / 5G Networks. *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 8. P. 2324-1–2324-30.

Beshley M.I., Pryslupskyi A.I., Beshley H.V. RADIO RESOURCE ALLOCATION AND LOAD BALANCING METHODS IN A 5G / NB-IOT NETWORK TO PROVIDE CRITICAL IOT SERVICES

It is expected that 5G will be a key factor in the new wave of IoT (Internet of things) development, namely the increase in the number of connected smart devices and improvements in platform architecture. Today, NB-IoT (Narrowband Internet of Things) technology is touted as the best option for features and deployment costs since the network does not require a gateway. Other infrastructure options need gateways to collect data from devices and then transmit it to a master server. While there are some significant advantages to using

NB-IoT on today's 4G networks, the main drawback is that it is not suitable for mission-critical IoT services that require ultra-reliable, ultra-low latency connectivity. Although the NB-IoT standard is still in the testing and improvement phase, the technology has a great future. It should become one of the components of the 5G-network specification for critical IoT services.

That's why this paper proposes a 5G mobile network architecture is proposed to provide critical IoT services by allocating narrowband spectrum and transferring part of the functions over the base station eNodeB to the IoT controller. A method for prioritizing IoT traffic to provide QoS in a heterogeneous 5G / NB-IoT network is developed. A method for allocating radio resources in the NB-IoT communication channel to ensure end-to-end quality of service is proposed. Smart queue management algorithms based on IoT traffic prioritization and load balancing methods in 5G networks are developed. A method of load balancing with data priorities based on the collected statistics of the LTE / IoT network resource monitoring system is proposed. The essence of this method is to ensure the quality of service of priority IoT traffic in the absence of necessary frequency-time resources within the main service cell. It is proved that the integrated use of the developed methods of IoT traffic prioritization and load balancing, can reduce the average latency of real-time end-to-end messages up to 3 times, while making the NB-IoT system suitable for providing ultra-reliable communication with low latency, which is important for the development of 5G networks.

Key words: *Internet of things, narrowband Internet of things, quality of service, 5G mission-critical services, load balancing.*