

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ**

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КАСІМ НАМІР ХАШІМ КАСІМ

Прим. № ____

УДК 004.738.5:621.396.6

**ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДОЛОГІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ІОТ
В МЕРЕЖІ 5G**

Спеціальність 05.12.02 – «Телекомунікаційні системи та мережі»

Технічні науки
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Н.Х. КАСІМ

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Касім Н.Х. Методологія забезпечення якості обслуговування IoT в мережі 5G. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – «Телекомунікаційні системи та мережі». - Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2024.

У дисертаційній роботі вирішується актуальна науково-прикладна проблема забезпечення якості обслуговування Інтернету речей в мережі стандарту LTE/5G шляхом розробки та вдосконалення методів та моделей маршрутизації та управління організацією доставки повідомлень в мережах Інтернету речей.

У роботі вперше розроблена концептуальна модель мережі стандарту 5G з наданням сервісів Інтернету речей, яка враховує особливості пристроїв IoT щодо автономного зв'язку між великою кількістю розумних пристроїв, які одночасно надсилають невеликі пакети даних та використовуючи широкий спектр програм, що вимагає інфраструктури, різної з точки зору розміру пакетів, щільності трафіку та якості обслуговування.

У роботі вперше наданий алгоритм адаптації параметрів мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей, який передбачає розрахунок скінченної множини альтернативних варіантів структури мережі, що дозволяє особі, яка приймає рішення, приймати найкращі альтернативні варіанти структури мережі IoT за критерієм якості обслуговування в мережі 5G.

Вдосконалена математична модель обслуговування агрегованого трафіку в мережі 5G, яка враховує характеристики по кожному з дев'яти класів запитів по пріоритетах, що дозволяє визначити усереднені для всіх класів запитів показники ефективності функціонування мережі 5G.

Вдосконалена модель взаємодії БПЛА з вузлами БСС, яка відрізняється від відомих тим, що може бути описана як система масового обслуговування, характеристики якої залежать від розподілу вузлів по території, часу

взаємодії з вузлами мережі, радіуса обслуговування і швидкості руху БПЛА.

Вдосконалена модель детермінованого потоку запитів за відомими координатами вузлів ЛСМ, оптимізація обслуговування якої може бути досягнута шляхом планування обслуговування вузлів мережі.

Вдосконалена модель для рою безпілотних літальних апаратів, що відрізняється від відомих тим, що рій БПЛА представлений у вигляді мережі черги, а основною характеристикою моделі є середня тривалість передачі інформації між елементами рою.

Розроблений алгоритм роботи координатору польоту ЛСМ щодо зміни маршрутизатора, який відрізняється від відомих тим, що враховує необхідність своєчасної заміни маршрутизатора для забезпечення збереження отриманих даних та для продовження польоту за маршрутом.

Удосконалено типовий алгоритм білінгової системи, якій полягає в введенні поняття «одиниця обміну інформації», де одиницею може бути як блок інформації визначеного розміру (одна транзакція), так і кількість таких блоків, що дозволяє використовувати білінгові системи для тарифікації обслуговування IoT як з великим, так і з малим трафіком. Новизною алгоритму є, по-перше, врахування особливостей пристроїв Інтернету речей як користувачів, по-друге, уточнена взаємодія самої білінгової системи щодо IoT та комутатором мобільної мережі, за допомогою якого спроможне обслуговувати пристрої IoT, які підключені до мобільної мережі 5G.

Ключові слова: LTE, 5G, БПЛА, Інтернет речей (IoT), телекомунікаційна мережа.

Список публікацій здобувача

1. Aqeel Mahmood Jawad Abu-Alshaeer, Nameer Hashim Qasim, Haider Mahmood O Jawad Abu-Alshaeer, Mahmood Jawad Abu-Alshaeer, Khlaponin Y., Sieliukov., Marek A. Basics of application of unmanned aerial vehicles/ under edition O.V. Sieliukov. – Poland, Vocational Training Center in Nowy Sącz Zamenhofa str., 133-300 Nowy Sącz, Poland, 2022. – 310 p. ISBN-978-83-922854-2-7. **Монографія** <https://www.e-isbn.pl/IsbnWeb/start/search.html>

2. Qasim N.H, Khlaponin Y.I, Vlasenko M.M., Application of unmanned aerial vehicles in the field of telecommunications and the Internet of things, Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток. Колективна **монографія** за матеріалами XXI Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 14-16 листопада 2022 р.) – заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2022. 242 с. – С. 92–94. URL: https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-12-06_UDK_book_Monografia_48x210.pdf.
3. Процик В.О., Хлапонін Ю.І., Вишняков В.М., Касім Н.Х. Методи вирішення проблеми примусу в електронних системах голосування / Methods of solving the problem of coercion in electronic voting systems. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2021. № 73. С.114–120. URL: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2021/73-12>
4. Касім Н.Х., Власенко М.М., Хлапонін Ю.І. Формалізація процесу управління передачею потоків трафіку на фрагменті мережі LTE. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2022. – № 75. – С.88–93. URL: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2022/75-09>.
5. Касім Н.Х., Сєлюков О.В., Власенко М.М., Лукова-Чуйко Н.В., Хлапонін Ю.І. Алгоритм білінгової системи мережі стандарту LTE/5G з наданням сервісів Інтернету речей / Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2022. – Випуск 6(137) – С. 36–46. URL: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.6.4>.
6. Хлапонін Ю.І. Методи керування трафіком від пристроїв Інтернету речей в мережі стандарту 5G / Ю.І. Хлапонін, М.М. Власенко, Н.Х. Касім // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2022. № 4 (77). С. 14–24. URL: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2022.041424>.
7. Qasim N.H., Pyliavskiy V., Solodka V. Development of test materials for assessment broadcasting video path / Розробка тестових матеріалів для

оцінювання трансляції відеочастини. Cornell university journal. Ithaca, NY 14850, USA. 2019.

8. Qasim N. H., Pyliavskiy V., Solodka V. Development of test materials for assessment broadcasting video path. Electrical Engineering and Systems Science: Image and Video Processing. 2019. Vol. 1907.11406, no. 529. P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.11406>. **Scopus**

9. Hashim N.H., Mohsim A.H., Rafeeq R.M., Pyliavskiy V. New approach to the construction of multimedia test signals. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. Volume 8, No.6, November 2019. C. 3423-3429. URL: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2019/117862019>. **Scopus**

10. Qasim N.H., Omar Faris Mahmood, Ibrahim Beram Jasim. Performance Enhancement of underwater channel using polar code-OFDM paradigm / International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2021/9. C. 55-62. URL: https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/volume_3/issue_9_september_2021/15978/final/fin_irjmets1630649429.pdf.

11. Nameer Hashim, Aram H Mohsim, Ranjdr M Rafeeq, Volodymyr Pyliavskiy Color correction in image transmission with multimedia path / Корекція кольору при передачі зображення з мультимедійної частини ARPJN Journal of Engineering and Applied sciences. 2020. № 10. P.1183-1188. ISSN 1819-6608 URL: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2020/jeas_0520_8215.pdf.

Scopus, Q3

12. Khlaponin Y., Izmailova O., Qasim N., Krasovska H., Krasovska K. Management risks of dependence on key employees: identification of personnel. Workshop on "Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems" (CPITS 2021) URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2923/paper33.pdf> **Scopus**

13. Qasim N., A Systematic review of Multi-Mode Fiber based on Dimensional Code in Optical-CDMA / A. Ghazi et al. Journal of Physics: Conference Series.

2021. Vol. 1860, no. 1. P. 012016. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1860/1/012016>. **Scopus**

14. Khlaponin Y., Qasim N., Vyshniakov V., Poltorak V. Concept of data protection technologies development in E-voting systems. International Research Journal of Modernization in Engineering technology and science. 2021. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. Volume:03 / Issue: 09 / September, 2021. P. 40-54 URL: https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/volume_3/issue_9_september_2021/15985/final/fin_irjmets1630649545.pdf

15. Alaan Ghazi, S.A Aljunid, Syed Zulkarnain Syed Idrus, CBM Rashidi, Aras Al-dawoodi, Baban A Mahmood, Alaa Fareed, Mohammed U Zaenal, Nameer Hashim Qasim, Ranjdr M Rafeeq A Systematic review of Multi-Mode Fiber based on Dimensional Code in Optical CDMA / Journal of Physics: Conference Series 2021/3/1. C. 12-16 URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1860/1/012016>. **Scopus**

16. Aqeel Mahmood Jawad, Nameer Hashim Qasim, Haider Mahmood Jawad, Mahmood Jawad Abu-Alshaeer, Rosdiadee Nordin, Sadik Kamel Gharghan. Near Field WPT Charging a Smart Device Based on IoT Applications. CEUR Workshop, Vol-3149 P. 124 – 131. – ISSN 1613-0073. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-3149/>. **Scopus**

17. Nameer Hashim Qasim, Aqeel Mahmood Jawad Abu-Alshaeer, Khlaponin Y. Analysis of the state and prospects of LTE technology in the introduction of the Internet of things, Norwegian Journal of development of the International Science. Oslo, Norway. 2022. Vol. 84, pp. 47–51. ISSN 3453-9875 URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6540099>.

18. Sieliukov A.V., Qasim N.H., Khlaponin Y.I., Conceptual model of the mobile communication network, The Workshop on Emerging Technology Trends on the Smart Industry and the Internet of Things «TTSIIT», January 19-20th, 2022 (online), p. 20-22. <https://www.knuba.edu.ua/wp->

content/uploads/2022/11/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_Optimized.pdf

19. Omed Rafiq Fatah, Nameer Hashim Qasim, Natalia Bodnar, Aqeel Mahmood Jawad Abu-Alshaeer, Omar Saad Ahmed. A Systematic Review and Meta-Analysis of the Latest Evidence on Online Shopping Intensity / Останній перегляд 11 квітня 2023. Доступно на Research Square, URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4414622>.

20. Fakher Rahim, Nataliia Bodnar, Nameer Hashim Qasim, Aqeel Mahmood Jawad, Omar Saad Ahmed. Integrating Machine Learning in Environmental DNA Metabarcoding for Improved Biodiversity Assessment: A Review and Analysis of Recent Studies / URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2823060/v1>.

21. Fakher Rahim, Nameer Hashim Qasim, Abzal Zhumagaliuly, Kenesh Dzzhusupov. Human Cystic Echinococcosis in The Populations of MENA Countries, With A Focus on The United Arab Emirates, From 1990 To 2019: From Genetic Epidemiology of Rare Disease to Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 / Останній перегляд 1 серпня 2023. Препринт. Доступно на Research Square, URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3190738/v1>.

22. Fakher Rahim, Kenesh Dzzhusupov, Nameer Hashim Qasim, Abzal Zhumagaliuly, Nataliia Bodnar, Rabiga Khozhamkul, Toguzbaeva Karlygash. Global Prevalence of Mental Disorders Due to Covid-19 In the Central Asia: A Systematic Analysis of The Global Burden of Disease Study From 1990 to 2019 / Останній перегляд 21 серпня 2023. Препринт. Доступно на Research Square, URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3257421/v1>.

23. Qasim N.H., Shevchenko Y.P., Pyliavskiy V.V. Analysis of methods to improve energy efficiency of digital broadcasting / Телекомунікації та радіотехніка. 2019. ISSN 0040-2508
URL: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i16.40>. **Scopus Q3**

24. Qasim N.H., Pyliavskiy V.V. Color temperature line: Forward and inverse transformation / Журнал. Фізика напівпровідників, квантова електроніка та

оптоелектроніка. 2020/1/1. С.75-80. URL: http://journal-spqeo.org.ua/n1_2020/v23n1-p075-080.pdf. **Scopus, WoS, Q3**

25. Nameer Hashim Qasim, Aqeel Mahmood Jawad, Haidar Mahmood Jawad, Khlaponin Y., Nikitchyn O. Devising a traffic control method for unmanned aerial vehicles with the use of gNB-IoT in 5G / Розробка методу управління трафіком безпілотних літальних апаратів за допомогою використання gNB-IoT В 5G. Східно-Європейський Журнал передових технологій – 2022. – № 3/9 (117). – С.53–59. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57103659600>.

Scopus Q3

26. Makarenko, A., Qasim, N., Turovsky, O., Rudenko, N., Polonskyi, K., Govorun, O. Reducing the impact of interchannel interference on the efficiency of signal transmission in telecommunication systems of data transmission based on the OFDM signal. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (9 (121)), 82–93. **Scopus, Q3.**

https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4376533

27. Власенко М.М., Касім Н.Х., Адаптивний захист інформації/ Adaptive information protection, IV Міжнародна науково-практична конференція “Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем” (PCSITS) 15-16 квітня 2021 року, тези доп. С.184-185, м. Київ. URL: <http://surl.li/lfshg>. (*особистий внесок здобувача: Досліджено адаптивний захист інформації.*)

28. Касім Н.Х., Хлапонін Ю.І., Симоненко О.А. Застосування технології LTE при впровадженні інтернету речей / Application of LTE technology in the introduction of the Internet of Thing, I науково-технічна конференція "Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку", 25-26 листопада 2021 р., тези доп. С.148-149, м. Київ. URL: http://www.viti.edu.ua/files/zbk/2021/c_2021.pdf.

29. Qasim N.H, Lukova-Chuiko N.V, The role of drones for evolving telecommunication and internet / Проблеми кібербезпеки інформаційно-

телекомунікаційних систем: Збірник матеріалів доповідей та тез, Київ, 27–28 жовтня 2022. – Київ, 2022. – С. 112–113. URL: <http://surl.li/lfsjz>.

30. Omed Rafiq Fatah, Nameer Qasim, The role of cyber security in military wars, Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем: Збірник матеріалів доповідей та тез, Київ, 27–28 жовтня 2022. – Київ, 2022. – С. 114–115. URL: <http://surl.li/lfsjz>.

31. Jawad A. M., Hashim Qasim N., Pyliavskiy V. Comparison of Metamerism Estimates in Video Paths using CAM's Models. 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 10–12 October 2022. 2022. **Scopus**. <https://doi.org/10.1109/picst57299.2022.10238685>.

32. Probiotics, prebiotics, and synbiotics for patients with autism spectrum disorder: a meta-analysis and umbrella review / Rahim F, Toguzbaeva K, Qasim NH, Dzhusupov KO, Zhumagaliuly A and Khozhamkul R. *Frontiers in Nutrition*. 2023. Vol. 10. **Scopus, Q1**. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1294089>.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	13
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ОБСЛУГОВУВАННЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ В МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ	27
1.1. Актуальність проблематики	37
1.2. Аналіз перспективного напрямку розвитку мобільних мереж зв'язку	41
1.3. Структура рівня користувача мережі 5G	50
1.4. Аналіз тенденцій розвитку Інтернету речей	64
1.5. Оцінка проблем управління якістю обслуговування Інтернету речей в мобільних мережах п'ятого покоління	70
1.6. Постановка задачі досліджень	75
1.7. Висновки за розділом 1	78
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ З АДАПТИВНИМ УПРАВЛІННЯМ ЯКІСТЮ	81
2.1. Розробка концептуальної моделі мережі стандарту 5G з наданням сервісів Інтернету речей	87
2.2. Математична модель взаємодії мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей	95
2.3. Розробка математичної моделі забезпечення якості обслуговування в мережі Інтернету речей	108
2.3.1. Показники якості обслуговування для мережі IoT	116
2.3.2. Показники якості обслуговування для мережі 5G	117
2.4. Математична модель обслуговування агрегованого трафіку	119
2.5. Висновки за розділом 2	122
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ СТРУКТУРНОЇ АДАПТАЦІЇ МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ	124
3.1. Типова структура літакової сенсорної мережі	126
3.2. Архітектура літакових цільових мереж	128
3.3. Типи вузлів бездротової сенсорної мережі	130
3.4. Мережеві топології бездротової сенсорної мережі	131
3.5. Теоретичні та практичні напрямки досліджень в області літаючих сенсорних мереж	132
3.6. Літакова сенсорна мережа як система масового обслуговування	135
3.7. Безпілотний літальний апарат як система масового обслуговування	136
3.8. Ройові БПЛА як мережа масового обслуговування	144
3.9. Натільні мережі в літаковій сенсорній мережі	149
3.10. Модель взаємодії в середині літакового сегмента в літаковій сенсорній мережі	150

3.11. Модель літаковій сенсорної мережі для передачі даних на великі відстані	154
3.12. Модель маршруту доставки пакетів даних в літаковій сенсорній мережі	156
3.13. Алгоритм передачі функції маршрутизатора в літаковій сенсорної мережі	162
3.14. Математична модель розрахунку необхідної кількості маршрутизаторів в літаковій сенсорної мережі	165
3.15. Висновки за розділом 3	167
РОЗДІЛ 4. МЕТОДОЛОГІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДАННЯ ЯКІСНИХ СЕРВІСІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ В МЕРЕЖІ СТАНДАРТУ 5G	169
4.1. Методологія надання якісних сервісів IoT в мережі 5G	170
4.2. Рівні методології надання якісних сервісів IoT в мережі 5G	171
4.3. Загальна характеристика процесу надання якісних сервісів	172
4.4. Висновки за розділом 4	188
РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЬ ОБЛІКУ НАДАННЯ СЕРВІСІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ В МЕРЕЖІ 5G	189
5.1. Процес білінгу	190
5.2. Білінгова система для IP-телефонії	193
5.3. Алгоритм білінгової системи мережі 5G з наданням сервісів IoT	198
5.4. Тарифікація послуг в мережі 5G з наданням сервісів IoT	203
5.5. Висновки за розділом 5	204
РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ АЛГОРИТМІВ ТА МОДЕЛЕЙ	206
6.1. Моделювання процесів в мережі IoT	208
6.2. Моделі трафіку інтернету речей	214
6.3. Моделі трафіку на основі потоку запитів	217
6.3.1. Гауссова модель трафіку	219
6.3.2. Модель ON/OFF (вмикання/вимикання) трафіку	230
6.3.3. Моделі трафіку IoT з обмеженим розподілом часових інтервалів	235
6.4. Моделювання процесів в мережах стандарту 5G	237
6.5. Моделювання мультисервісного трафіку з пристроями Інтернету речей в мережах стандарту 5G	239
6.6. Особливості обслуговування трафіку з пристроями тактильного інтернету в мережах стандарту 5G	243
6.7. Висновки за розділом 6	244
ВИСНОВКИ	246
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	249

Додаток А. РІШЕННЯ СИСТЕМИ НЕОДНОРІДНИХ РІВНЯНЬ ДЛЯ МЕРЕЖІ СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ	271
Додаток Б. ФРАГМЕНТИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БІЛІНГОВОЇ СИСТЕМИ ОПЕРАТОРА ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ОБЛІКУ ВИКОРИСТАННЯ ІОТ	273
Додаток В. ДОКУМЕНТИ, ЯКІ ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ОСНОВНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІОННОЇ РОБОТИ	276
Додаток Г. МОДЕЛЬ ВХІДНОГО ПОТОКУ ЗАПИТІВ ВІД КІНЦЕВИХ ІОТ-ПРИСТРОЇВ ДО МАРШРУТИЗАТОРА	281
Додаток Д. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ВХІДНОГО ПОТОКУ ЗАПИТІВ ВІД КІНЦЕВИХ ІОТ-ПРИСТРОЇВ ДО МАРШРУТИЗАТОРА ЗА РОЗПОДІЛОМ ПУАССОНА	282
Додаток Е. МОДЕЛЬ ВХІДНОГО ПОТОКУ ЗАПИТІВ ВІД КІНЦЕВИХ ІОТ-ПРИСТРОЇВ ДО МАРШРУТИЗАТОРА ЗА РОЗПОДІЛОМ ПАРЕТО	287
Додаток Ж. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ВХІДНОГО ПОТОКУ ЗАПИТІВ ВІД КІНЦЕВИХ ІОТ-ПРИСТРОЇВ ДО МАРШРУТИЗАТОРА ЗА РОЗПОДІЛОМ ПАРЕТО	289
Додаток З. МОДЕЛЬ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗАПИТІВ В МЕРЕЖІ 5G	293
Додаток І. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗАПИТІВ В МЕРЕЖІ 5G	297
Додаток К. МОДЕЛЬ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗАПИТІВ ВІД ІОТ- ПРИСТРОЇВ В МЕРЕЖІ 5G	306
Додаток Л. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗАПИТІВ ВІД ІОТ-ПРИСТРОЇВ В МЕРЕЖІ 5G	310

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АС – абонентська станція

АП – абонентський пристрій

АТ – абонентський термінал

БС – базова станція

БУМ – блок управління мобільністю

ДПФ – дискретне перетворення Фур'є

ЕМС – електромагнітна сумісність

ЛСМ – літаючі сенсорні мережі

МС – мобільна станція

ОШ – обслуговуючий шлюз

ПШ – пакетний шлюз

AMF – функція доступу та управління мобільністю (Access and Mobility Function)

ANSI – Американський національний інститут стандартів

API – інтерфейси прикладного програмування (Application Programming Interfaces)

BSR – звіт про статус буфера (Buffer Status Report)

CDR – детальний запис про виклик (Call Detail Record)

CP – префікс циклічності

CSI – індекс задоволеності клієнта (Customer Satisfaction Index)

C-RNTI – тимчасові ідентифікатори радіомережі (Radio Network Temporary Identifiers)

D2D – підтримка взаємодії між пристроями (Device-to-Device)

DCI – інформація про управління низхідною лінією зв'язку (Downlink Control Information)

DSCP – поле коду диференційованої послуги (Differentiated Services Code Point)

DL – низхідний канал зв'язку (DownLink)

eMBB – мобільний широкопasmовий доступ (Enhanced Mobile Broadband)

- EPS – система обробки пакетів (Evolved Packet Core)
- ETSI – Європейський інститут телекомунікаційних стандартів
- FDD – частотний розподіл каналів (Frequency Division Duplex)
- FOFDM – відфільтроване мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів (Flash Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
- RFID – радіочастотна ідентифікація (Radio frequency identification)
- GSM – глобальна система мобільного зв'язку (Global System for Mobile Communication)
- HSM – спектральний менеджер (Hierarchical Spectrum Manager)
- HSS – послуга «Домашній абонент» (Home Subscriber Service)
- IaaS – інфраструктура як послуга (Infrastructure as a Service)
- IWF – IoT World Forum (Всесвітній форум IoT)
- ІІС – Консорціум індустріального Інтернету (Industrial Internet Consortium)
- ІоЕ – Інтернету всього (Internet of Everything)
- ІoS – інтернет навичок (Internet of Skills)
- ІоТ – інтернет речей (Internet of Things)
- ISP – організація, що надає користувачам доступ до мережі Інтернет та пов'язані з цим послуги (Internet Service Provider)
- ІТ – інформаційні технології (Information Technology)
- LTE – «довготерміновий розвиток», маркетингова назва технології 4G (Long Term Evolution)
- LDPC – кодування з малою щільністю перевірок на парність (Low Density Parity Check)
- LAA – неліцензійна частина спектра для умовно вільного доступу (Licensed Assisted Access),
- LSA – ліцензійна частина спектра для вільного доступу (Licensed Sharing Access)
- LoA – рівень автоматизації (Level of Automation)
- MBB – мобільний широкопasmуговий доступ (Mobile Broadband)
- MCE (ITU) – Міжнародний союз електрозв'язку (International

Telecommunication Union)

MIMO – метод просторового кодування сигналу (Multiple Input Multiple Output)

MiоT – Інтернет машин (Machine Type Communication)

MME – центр управління мобільністю (Mobility Management Entity)

MSC–центр мобільної комутації (Mobile Switching Center)

MSGin5G – служба обміну сповіщеннями між пристроями IoT (Message Service used for person-to-thing and thing-to-thing communication within the 5G system)

NB-IoT – вузькосмуговий IoT (Narrowband Internet of Things)

NG-U – інтерфейс плану користувача (User Plane Interface)

NIST – National Institute of Standards and Technology (Національний інститут стандартів і технології)

NOMA – неортогональний множинний доступ

NR – стандарт радіодоступу (New Radio)

NRB – ресурсний блок

NFV – віртуалізація мережевих функцій (Network Functions Virtualisation)

NSSAI – додаткова інформація про мережеві рівні (Network Slice Selection Assistance Information)

NS – мережевий рівень (Network Slicing)

OFDMA – множинний доступ до ортогонального частотного поділу (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

OT – операційні технології (Operational Technology)

PDB – сумарна затримка передавання пакетів (Packet Delay Budget)

PDN – мережа пакетної передачі (Packet Data Network)

PC – полярний код (Polar Code)

PCRF – політика та правила нарахування (Policy and Charging Rules Function)

PLMN – наземна рухома мережа загального користування PLMN (Public Land Mobile Network Identifier)

P-GW – шлюз пакетної мережі даних (Packet Data Network Gateway)

QoS – якість обслуговування (Quality of Service)

RB – ресурсний блок

RLC – контроль радіозв'язку (Radio link control)

SCC – вторинні агрегатні несні (Secondary Carrier Channel)

SCMA – багатостанційний доступ на основі розріджених кодів (Sparse Code Multiple Access)

SDN – програмно-визначені мережі (Software Defined Networking)

SLA – угода про рівень обслуговування (Service Level Agreement)

SLS – параметризація трафіку (Service Level Specification)

S-GW – обслуговуючий шлюз (Serving Gateway)

S-NSSAI – ідентифікатор мережевого сегменту (Single Network Slice Selection Assistance Information)

SON – мережа, що самоорганізується (Self-Organizing Networks)

TDD – часовий розподіл каналів (Time Division Duplex)

ToS – тип обслуговування (Type of Service)

UMTS – універсальна мобільна телекомунікаційна система (Universal Mobile Telecommunications System)

UPF – функція площини користувача (User Plane Function)

URLLC – наднадійний зв'язок між машинами з низькою затримкою (Ultra Reliable Low Latency Communication)

UE – пристрої користувача (User Equipment)

WiFi – стандарт IEEE 802.11 (Wireless Fidelity)

WIMAX - технологія широкосмугового доступу в мікрохвильовому діапазоні (Worldwide Interoperability for Microwave Access)

WAN – глобальна мережа (Wide Area Network)

WFD – технологія (Wi-Fi Direct)

WLAN – локальна комп'ютерна мережа (Wireless Local-Area Network)

WPAN – персональна комп'ютерна мережа (Wireless Personal Area Network)

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні мережі зв'язку, що поєднують в собі засоби доставки і обробки інформації, стали невід'ємною частиною сучасного життя інформаційного суспільства. Одним з основних напрямків їх розвитку в даний час є реалізація концепції побудови Інтернету речей (IoT) [28]. Розвиток IoT включає в себе розробку як технологій отримання інформації, так і методів організації каналів зв'язку і мереж для передачі даних між елементами цих мереж. Особливості мереж IoT багато в чому визначаються особливостями прикладних завдань і сферою їх застосування. Ці особливості полягають як в способах отримання інформації та формування повідомлень для їх передачі, так і в способі побудови самих мереж IoT. Останні можуть бути побудовані як мережі збору інформації (моніторингу) і як мережі розподілу інформації. Ці особливості відображаються у властивостях трафіку IoT, які необхідно враховувати при організації його обслуговування. Однією з характерних особливостей мереж IoT є висока щільність пристроїв (мережевих вузлів), яка може бути у багато разів вище щільності абонентів в сучасних мобільних мережах. Ця особливість неодноразово описувалася в роботах по побудові мереж IoT, проте слід зазначити, що розподіл щільності абонентів мобільних мереж зв'язку по планеті, континентах і навіть країнах вкрай нерівномірно. Практично в будь-якій країні світу є регіони з високою і низькою щільністю абонентів мобільних мереж зв'язку. Розумно припустити, що і щільність мереж IoT може мати різну щільність в різних регіонах і територіях, а також в різних умовах експлуатації. Перераховані вище особливості трафіку, а також структурні характеристики мереж IoT вимагають розробки моделей і методів, що дозволяють максимально реалізувати функціонал IoT в різних умовах, а також забезпечити його співіснування з існуючими і майбутніми гетерогенними мережами зв'язку. Тема роботи актуальна, так як спрямована на вирішення саме цих завдань.

Ступінь розвитку теми. Характеристики трафіку, протоколи його обслуговування в мережах зв'язку, методи вибору структури завжди були найважливішими об'єктами дослідження для будь-яких мереж зв'язку. В останні роки досягнуто значного прогресу в області досліджень мереж Інтернету речей, опубліковано відносно велику кількість робіт на цю тему. Серед робіт вітчизняних і зарубіжних авторів відзначимо праці К. Я. Бортника, О. А. Баранова, С. М. Брайчевського, А. П. Гненного, Ю. Є. Грудзинського, А. М. Давидюк, Н. О. Іванченка, Е. О. Ким, О. В. Мнушка, Р. Д. Сердюкова, О. С. Єременко, Ю. І. Хлапоніна, Р. С. Одарченка, І. М. Срібна, М. І. Бешлей, І. М. Журавська, О. О. Манько, К. Ванга, Т. Чжана, Г. Мессьє, І. Г. Фінверса і багатьох інших. Їх робота дозволила оцінити можливості мереж зв'язку для передачі трафіку, знайти нові підходи до побудови архітектури бездротових мереж Інтернету речей та до вирішення завдань забезпечення якості обслуговування. Однак слід зазначити, що спектр завдань при побудові мереж IoT надзвичайно широкий. Це визначається широким спектром застосування таких мереж, а також існує велика необхідність в розробці відповідних моделей і методів вирішення цих завдань або виступати в якості альтернативних рішень. Незважаючи на результати, досягнуті в напрямку розробки моделей і методів побудови мереж IoT, наукова робота ведеться безперервно, про що свідчить велика кількість публікацій. У дисертації розробляються моделі трафіку IoT, аналізується його вплив на якість функціонування мереж зв'язку, а також розробляються методи обслуговування трафіку і вибору структури мереж IoT.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з реалізацією основних положень «Концепції розвитку телекомунікацій в Україні», «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні», «Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки» та рекомендацій щодо «Реформ галузі інформаційно-комунікаційних технологій

та розвитку інформаційного простору України».

Мета роботи і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є забезпечення якості обслуговування Інтернету речей в мережі стандарту 5G шляхом розробки та вдосконалення методів та моделей маршрутизації та управління організацією доставки повідомлень в мережах Інтернету речей. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі послідовно вирішуються наступні завдання:

- аналіз тенденцій розвитку Інтернету речей;
- аналіз технологій побудови мереж Інтернету речей;
- оцінка проблем управління якістю обслуговування Інтернету речей в мобільних мережах п'ятого покоління;
- розробка концептуальної моделі мережі стандарту 5G з наданням сервісів Інтернету речей;
- розробка математичної моделі взаємодії мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей;
- розробка математичної моделі забезпечення якості обслуговування в мережі Інтернету речей;
- оцінка показників якості обслуговування для мережі IoT;
- оцінка показників якості обслуговування для мережі 5G;
- розробка математичної моделі обслуговування агрегованого трафіку;
- розробка алгоритму білінгової системи мережі 5G з наданням сервісів IoT;
- оцінка тарифікації послуг в мережі 5G з наданням сервісів IoT;
- розробка методу маршрутизації трафіку в мережі Інтернету речей;
- розробка методу вибору місць розташування шлюзів в мережі Інтернет речей;
- розробка методу організації мережі Інтернету речей як мережі, толерантної до затримок.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процес забезпечення якості обслуговування Інтернету речей в мережі стандарту 5G.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є моделі та методи адаптивного управління якістю обслуговування в мережі Інтернету речей.

Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їх новизна. В ході вирішення поставленої наукової проблеми та розв'язання сформульованих задач дослідження були отримані такі нові наукові результати:

1. Вперше розроблена концептуальна модель мережі стандарту 5G з наданням сервісів Інтернету речей, яка враховує особливості пристроїв IoT щодо автономного зв'язку між великою кількістю розумних пристроїв, які одночасно надсилають невеликі пакети даних та використовуючи широкий спектр програм, що вимагає інфраструктури, різної з точки зору розміру пакетів, щільності трафіку та якості обслуговування.

2. Вперше наданий алгоритм адаптації параметрів мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей, який передбачає розрахунок скінченної множини альтернативних варіантів структури мережі, що дозволяє особі, яка приймає рішення, приймати найкращі альтернативні варіанти структури мережі IoT за критерієм якості обслуговування в мережі 5G.

3. Вдосконалена математична модель взаємодії мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей, яка розглядає мережу IoT як систему масового обслуговування, що дозволяє визначати стаціонарний розподіл ймовірностей станів системи, яка складається з пристроїв IoT та комутатору мережі стандарту 5G.

4. Вдосконалена математична модель забезпечення якості обслуговування в мережі Інтернету речей, яка враховує послідовність обслуговування запитів IoT в мережі 5G, що дозволяє розраховувати параметри якості обслуговування запитів в мережі Інтернету речей.

5. Вдосконалена математична модель обслуговування агрегованого трафіку в мережі 5G, яка враховує характеристики по кожному з дев'яти класів запитів по пріоритетах, що дозволяє визначити усереднені для всіх класів запитів показники ефективності функціонування мережі 5G.

6. Вдосконалена модель взаємодії БПЛА з вузлами БСС, яка відрізняється від відомих тим, що може бути описана як система масового обслуговування, характеристики якої залежать від розподілу вузлів по території, часу взаємодії з вузлами мережі, радіуса обслуговування і швидкості руху БПЛА.

7. Вдосконалена модель детермінованого потоку запитів за відомими координатами вузлів ЛСМ, оптимізація обслуговування якої може бути досягнута шляхом планування обслуговування вузлів мережі.

8. Вдосконалена сервісна модель обслуговування запитів від вузлів БСС при невідомих координатах їх розташування, яка може бути представлена у вигляді системи черг з виходом заявок з черги (з обмеженим часом очікування).

9. Вдосконалена модель для рою безпілотних літальних апаратів, що відрізняється від відомих тим, що рій БПЛА представлений у вигляді мережі черги, а основною характеристикою моделі є середня тривалість передачі інформації між елементами рою.

10. Розроблений алгоритм роботи координатору польоту ЛСМ щодо зміни маршрутизатора, який відрізняється від відомих тим, що враховує необхідність своєчасної заміни маршрутизатора для забезпечення збереження отриманих даних та для продовження польоту за маршрутом.

11. Розроблена математична модель розрахунку необхідної кількості маршрутизаторів в літаковій сенсорній мережі, яка відрізняється від відомих тим, що за рахунок знання інтенсивності енергетичних втрат БПЛА на політ і радіоз'вязок можливо заздалегідь розрахувати необхідну кількість маршрутизаторів на вісь маршруту польоту.

12. Вдосконалена математична модель обслуговування агрегованого трафіку в мережі 5G, яка враховує характеристики по кожному з дев'яти класів запитів по пріоритетах, що дозволяє визначити усереднені для всіх класів запитів показники ефективності функціонування мережі 5G.

13. Удосконалений типовий алгоритм білінгової системи, якій полягає

в введенні поняття «одиниця обміну інформації», де одиницею може бути як блок інформації визначеного розміру (одна транзакція), так і кількість таких блоків, що дозволяє використовувати білінгові системи для тарифікації обслуговування IoT як з великим, так і з малим трафіком. Новизною алгоритму є, по-перше, врахування особливостей пристроїв Інтернету речей як користувачів, по-друге, уточнена взаємодія самої білінгової системи щодо IoT та комутатором мобільної мережі, за допомогою якого спроможне обслуговувати пристрої IoT, які підключені до мобільної мережі 5G.

Вищенаведені наукові результати дають можливість вирішити проблему забезпечення якості обслуговування Інтернету речей в мережі стандарту 5G.

Теоретичне і практичне значення дослідження. Теоретичне значення полягає в тому, що в роботі розширюється спектр моделей і методів опису впливу IoT-пристроїв на якість обслуговування і властивості трафіку мережі стандарту 5G, а також методів організації доставки повідомлень в мережах Інтернет речей.

При цьому отримані результати дозволяють:

- особі, яка приймає рішення, приймати найкращі альтернативні варіанти структури мережі IoT за критерієм якості обслуговування в мережі 5G;
- визначати стаціонарний розподіл ймовірностей станів системи, яка складається з пристроїв IoT та комутатору мережі стандарту 5G;
- розраховувати параметри якості обслуговування запитів в мережі Інтернету речей;
- заздалегідь розрахувати необхідну кількість маршрутизаторів для кластеру безпілотних літальних апаратів на вісь маршруту польоту
- визначити усереднені для всіх класів запитів показники ефективності функціонування мережі 5G;
- використовувати білінгові системи для тарифікації обслуговування IoT як з великим, так і з малим трафіком:
- проаналізувати та визначити серед показників якості обслуговування

мережі стандарту 5G найбільш інформативний параметр;

- адаптивно змінювати пріоритети обслуговування пакетів даних Інтернету речей в мережі стандарту 5G.

Структура і зміст роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків і має 286 сторінок основного тексту, 157 рисунків, 18 таблиць, 37 сторінок додатків. Список використаних джерел містить 273 найменування і займає 34 сторінки. Загальний обсяг дисертаційної роботи – 317 сторінок

Методологія і методи дослідження. Для вирішення завдань, поставлених в дисертації, використовувалися методи теорії ймовірностей, математичної статистики, квантової регресії, теорії графів, теорії масового обслуговування, імітаційного моделювання та інтелектуального керування.

Основні положення захисту:

1. Концептуальна модель мережі стандарту 5G з наданням сервісів Інтернету речей.

2. Математична модель взаємодії мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей.

3. Математична модель забезпечення якості обслуговування в мережі Інтернету речей.

4. Модель взаємодії безпілотних літальних апаратів з вузлами безпроводної сенсорної мережі.

5. Алгоритм роботи координатора польоту кластеру безпілотних літальних апаратів щодо зміни його маршрутизатора.

6. Модель для кластеру безпілотних літальних апаратів.

7. Математична модель розрахунку необхідної кількості маршрутизаторів в літаковій сенсорній мережі.

8. Алгоритм білінгової системи мережі стандарту 5G з наданням сервісів Інтернету речей.

9. Методологія забезпечення надання якісних сервісів інтернету речей. в мережі стандарту 5G.

Достовірність отриманих автором науково-практичних результатів визначається обґрунтованим вибором об'єкта дослідження, вихідними даними при постановці конкретних завдань дослідження, прийнятими припущеннями і обмеженнями, а також відповідністю результатів аналітичного і імітаційного моделювання, проведеного особисто автором, узгодженістю з даними, отриманими іншими авторами і перевіркою результатів досліджень на міжнародних і всеросійських науково-технічних конференціях.

Ступінь достовірності та апробації отриманих результатів.

Достовірність результатів дисертаційної роботи підтверджується правильним використанням математичного апарату і результатів імітаційного моделювання. Основні теоретичні та практичні результати роботи, в тому числі розроблені імітаційні моделі, були використані в навчальному процесі кафедри кібербезпеки та комп'ютерної інженерії КНУБА та у Аль-Рафідайн Університеті (Багдад, Ірак) при читанні лекцій та проведенні практичних занять і лабораторних робіт.

Апробація результатів дослідження. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися 7 наукових і науково-технічних конференціях і семінарах, а саме: 6-а Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрями захисту інформації», 2-6 вересня 2020 р. (м. Одеса, Україна); IV Міжнародна науково-практична конференція “Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем” (PCSITS) 15-16 квітня 2021 року (м. Київ, Україна); I науково-технічна конференція "Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку", 25-26 листопада 2021р., (м. Київ, Україна); The I Workshop on Emerging Technology Trends on the Smart Industry and the Internet of Things «TTSIT», January 19-20th, 2022 (online) (м. Київ, Україна, м. Багдад, Ірак, м. Бельсько-Бяла, Польща); V Міжнародна науково-практична конференція “Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем” (PCSITS), Київ, 27–28 жовтня

2022; The II Workshop on Emerging Technology Trends on the Smart Industry and the Internet of Things «ТТSIIТ», January 24-25th, 2023 (online). (м. Київ, Україна, м. Багдад, Ірак, м. Бельсько-Бяла, Польща).

Результати дисертаційної роботи впроваджено у Державному підприємстві «Науковий центр точного машинобудування» Державного космічного агентства України (акт впровадження № 013 від 4.04.2022 р.), ТОВ "Світ-ІТ", (акт впровадження № 1211-19 від 11.10.2022 р.), ТОВ «ТЕХНОПАРК А+», (акт впровадження від 28 лютого 2023 р.), у навчальному процесі: - у Київському національному університеті будівництва і архітектури (Довідка про впровадження від 25.09.2023 р. № 17); у Аль-Рафідайн Університеті (Багдад, Ірак).

Матеріали дисертації використані в НДДКР «Ідентифікація переходу до закритичного режиму роботи робототехнічної системи», державний реєстраційний номер: 0123U103047, дата реєстрації: 29-06-2023 та в НДДКР «Методи і моделі забезпечення безпеки та діагностики критичних параметрів у складних системах з використанням ІоТ», державний реєстраційний номер: 0123U103640, дата реєстрації: 05-09-2023.

Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами впровадження.

Публікації. Основні наукові положення та результати дисертаційного дослідження опубліковано в 32 наукових працях, у тому числі:

- 2 монографій, одна з яких видана в країні Євросоюзу;

- 7 статей у наукових періодичних виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України (в т.ч. 3 включені до міжнародних наукометричних баз SCOPUS);

- 16 статей у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямку, з якого підготовлено дисертацію (в. т.ч. 10, що включені до міжнародних наукометричних баз SCOPUS та/або Web of Science Core Collection, 1 з яких у виданнях, віднесених до першого та 5 - до третього квартилів (Q1—Q3)

відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports;

- 7 тез та доповідей на наукових конференціях.

Відповідність спеціальності. Дисертаційна робота відповідає пунктам 1, 4, 6, 14 та 18 паспорту спеціальності 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі.

Особистий внесок автора. Результати теоретичних і експериментальних досліджень були отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувач відіграє головну роль в постановці і вирішенні завдань, а також узагальненні отриманих результатів.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ОБСЛУГОВУВАННЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ В МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

Під п'ятим поколінням мобільних мереж або п'ятим поколінням бездротових систем слід розуміти наступний телекомунікаційний стандарт для мобільних мереж після стандартів 4G/IMT-Advanced [69]. Першим стандартом цієї технології став ухвалений наприкінці 2017 року стандарт New Radio (NR). Передбачено, що розгортання нових технологій відбуватиметься в декілька етапів. Спочатку була впроваджено технологія 5G NR Non stand-alone, яка використовує наявну мережу 4G LTE eNB [65], а вже потім технологія 5G буде забезпечуватиме швидшу передачу даних у порівнянні з 4G, зробить можливим щільніше розташування пристроїв, та надасть можливості для прямої взаємодії між різними пристроями [44], а також скоротити затримки та зменшити споживання електричної енергії у порівнянні з 4G [60], у т.ч. для мобільних пристроїв та пристроїв типу «інтернет речей» (IoT).

Технологія 5G буде забезпечуватиме послуги з'єднання наступного типу:

- eMBB (розширене мобільне широкосмтцове з'єднання). Ці послуги вимагають високої ємності, високої швидкості і динамічного розподілу пропускної здатності. Особливістю цієї послуги є те, що пропускна здатність може бути виділена за запитом для відео надвисокої чіткості (UHD), віртуальної реальності, доповненої реальності тощо.
- uRLLC (ультранадійний і з низькою затримкою зв'язок). Ці послуги вимагають високої надійності, високої доступності і низької затримки. Висока надійність підтримує критично важливі послуги, такі як підключені роботизовані заводи та віддалена хірургія, тоді як низька затримка робить критично важливі для затримки послуги, такі як автономні автомобілі та дрони з дистанційним керуванням.

- mMTC (масивні комунікації машинного типу). Ці послуги вимагають високої ємності, високої швидкості, динамічного розподілу пропускної здатності. Ця послуга найбільше підходить для послуг Інтернету речей (IoT), таких як розумні міста, обслуговуючи мільярди «речей» та «пристроїв» до щільності один мільйон на квадратний кілометр.

Серед іншого, стандарт 5G забезпечує такі характеристики [94]:

- швидкість завантаження даних на одну базову станцію до 20 Гб/с;
- швидкість завантаження даних для одного абонента до 100 Мб/с та вивантаження до 50 Мб/с;
- можливість абонентському пристрою рухатись зі швидкістю до 500 км/год між базовими станціями, наприклад, у швидкісному потязі;
- можливість пристроям перемикатись між режимом заощадження енергії та повністю робочим режимом за 10 мс;
- затримки передачі даних - до 4 мс за сприятливих умов і до 1 мс для спеціалізованих з'єднань;
- ефективне використання радіочастотного спектру;
- кількість абонентських пристроїв - до 1 млн пристроїв на 1 км² [94].

Малі затримки разом із високою швидкістю передачі даних дозволяють передавати дедалі більшу частину обробки і зберігання даних з абонентських пристроїв на потужніші сервери в хмарах, що преж за все можуть стати в пригоді пристроям типу «інтернет речей», системам управління безпілотними автомобілями [23] та іншим вбудованим і «розумним» комп'ютерним системам [25, 32], а також зможе забезпечити технології віртуальної реальності, розумного міста та мережевих роботів.

Зв'язок за технологією 5G використовує два діапазони електромагнітних хвиль — FR1 (600–6000 МГц) та FR2 (24–100 ГГц).

Для досягнення поставлених показників роботи мереж п'ятого покоління використовуються наступні технології [175]:

- малі базові станції розв'язують проблеми, які пов'язані із швидким згасанням міліметрових хвиль, шляхом використання базових станцій з

низьким енергоспоживанням, малими габаритами, будуть портативними, що дозволяє можливість встановлювати їх тисячами на відстані 250 м одна від однієї;

- базові станції мають масиви антенних систем за технологією МІМО, яка вже була наявна в базових станціях за технологією 4G, але за технологією 4G є лише 8 портів для передачі та 8 для отримання даних. В базових станціях за технологією 5G таких портів вже буде сотні, що реалізовано на основі багатоелементних цифрових антенних решіток [94];
- технологія BeamForming вирішує проблеми з інтерференцією хвиль через збільшення портів вводу-виведення МІМО;
- передавання даних між абонентом та базовою станцією в режимі повного дуплексу;
- підвищення спектральної ефективності на основі неортогонального множинного доступу (NOMA) та різних варіантів неортогональних за технологію N-OFDM;
- кодування з малою щільністю перевірок на парність (LDPC), за рахунок чого досягається відносна простота реалізації засобів кодування.

Визначення терміна «якість обслуговування». В Рекомендації МСЭ-Т E.800 представлений набір термінів, які широко використовуються при дослідженнях якості обслуговування (QoS) та керування ним [146]. Відповідно до Рекомендацій якість обслуговування - це певна інтегральна оцінка, яка визначає ступінь задоволеності користувача наданою йому послугою зв'язку. Це визначення уточнене в Рекомендації як: «Якість обслуговування — ступінь відповідності обслуговування, надаваного користувачеві постачальником, угоді між ними». Це надає ще більшого значення угодам (Service Level Agreement, SLA) між користувачами та постачальниками послуг.

Фахівцями компанії Cisco введено таке визначення терміна якість обслуговування — «здатність мережі забезпечити необхідний сервіс заданому трафіку в певних технологічних рамках (Frame Relay, АТМ,

Ethernet і 802.1 мережі, SONET і IP-мережі)». Відповідно до змісту RFC 2475 [146] під сервісом слід розуміти набір характеристик передачі пакетів в одному напрямку по одному або декількох мережних маршрутах.

Висока якість послуг забезпечується системою якості, яка включає адміністративну й технічну складові. Адміністративна складова системи якості — це організаційна робота щодо забезпечення якості послуг, добору та навчання персоналу, створення нормальних умов праці, заохочення за досягнення високої якості послуг, аналіз підсумків роботи щодо підвищення якості послуг, маркетинг тощо. Технічна складова системи якості включає визначення характеристик якості послуг, встановлення на них норм і доведення якості послуг до нормативних показників.

Типове рішення завдань щодо QoS охоплює такі сфери [146]:

- класифікацію аплікацій із призначенням пріоритетів і диференціюванням трафіка;
- профілювання мережного трафіка;
- обмеження (за необхідності) інтенсивності трафіка, який надходить від користувачів;
- управління чергами із встановленням черговості обробки пакетів на мережних вузлах;
- маршрутизація мережного трафіка.

Розв'язання задач щодо забезпечення QoS у рамках наведених областей, визначаючи свій набір управляючих механізмів і протоколів, має відбуватися взаємопов'язано й узгоджено. Наприклад, класифікація трафіка багато в чому визначає особливості розв'язання інших завдань, таких як маршрутизація, розподіл каналних і буферних ресурсів тощо.

У мережі 5G може використовуватися механізм ідентифікатора класу якості обслуговування (QCI), який називається 5QI.

5QI - це механізм, в якому пакети класифікуються на різні класи QoS. Таким чином, QoS можна адаптувати до конкретних вимог. Кожен клас QoS має свої присвоєні характеристики QoS (такі як затримка пакетів і втрата

пакетів). В результаті деякі пакети можуть отримати кращий QoS, ніж інші пакети. Враховуючи архітектуру, коли послуги доступу до Інтернету надаються через мережеві зрізи паралельно зі спеціалізованими послугами в інших зрізах, 5G може бути використаний як захід управління трафіком, щоб запропонувати послуги доступу до Інтернету, що відповідають правилам розумного управління трафіком для надання різних «категорій трафіку».

Концепція QoS стандарту 5G базується на потоці. Пакети класифікуються і маркуються ідентифікатором QoS Flow Identifier (QFI). Потоки будуть двох типів: один зі стандартизованими профілями QoS, де використовується тільки значення QFI, а інший - з специфічними для оператора профілями QoS, де між елементами мережі також сигналізують атрибути QoS. Потоки 5G QoS функціонують на наступних принципах:

- служби E2E відносяться до мережі або служб додатків між UE і зовнішньою мережею передачі даних, наприклад, Інтернетом. Різні послуги E2E вимагають диференційованого лікування QoS;
- кожна послуга E2E може мати один або кілька потоків IP. SDF (Service Data Flow) - це один IP-потік або агрегація IP-потоків трафіку UE, класифікованих за типом послуги, яка використовується;
- 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. Цей потік QoS забезпечує передачу E2E між UE та UPF протягом усього терміну служби сеансу PDU;
- один сеанс PDU може нести один або кілька потоків QoS, де всі потоки QoS певної сесії PDU направляються по одному тунелю NG-U;
- QoS Flow ID (QFI) використовується для ідентифікації потоку QoS в сеансі PDU;
- QFI використовується у всіх типах сесій PDU, і значення його унікальне в кожній сесії PDU;

- кожен потік QoS характеризується набором параметрів, які визначені в профілі QoS, наприклад, ідентифікатор 5G QoS (5QI), ARP або гарантована швидкість потоку (GFBR);
- радіоносій може нести один або кілька потоків QoS. Кожен сеанс PDU має унікальний набір радіоносіїв, і gNodeB вирішує, над яким радіоносієм відправляється потік QoS.

Стандартизація технічних вимог щодо якості послуг у мережах зв'язку здійснюється на глобальному рівні Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU), на міжнародному регіональному рівні — Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI), Асоціацією телекомунікаційної промисловості (TIA), Американським національним інститутом стандартів (ANSI) та ін. Усі ці організації взаємодіють між собою під час розробки стандартів, особливо, коли йдеться про стандарти глобального характеру.

Угода про рівень обслуговування (SLA). Додаткову складність при забезпеченні QoS викликає той факт, що користувачі оцінюють якість надаваних послуг суб'єктивно (наприклад, при перегляді відеоматеріалів користувача цікавить якість прийнятого зображення). Таким чином, вони оцінюють якість послуг «у цілому», а не у вигляді сукупності параметрів, значення яких найчастіше не розуміють. У зв'язку з цим оператори зв'язку мають потребу в універсальному способі домовлятися з користувачем про якість надаваних послуг, тобто методі, який би представив для оператора якість послуг з погляду користувача. Таким методом стала «угода про рівень обслуговування», яка є важливим елементом, що регламентує роботу всіх механізмів QoS.

Відповідно до Рекомендації ITU-T E.860, угода про рівень послуг — це формальна угода між двома й більше об'єктами права, якої було досягнуто після узгодження характеристик послуги, відповідальності та пріоритету кожної зі сторін. Постачальник послуг має гарантувати, що користувач отримає, щонайменше, обговорений рівень QoS. SLA є контрактом на обслуговування між провайдером і користувачем, що гарантує певні

- характеристики якості наданих послуг. Звично у договорі SLA визначаються:
- плата за обслуговування залежно від обраного рівня обслуговування;
 - параметри QoS для даного рівня (середня та (або) максимальна затримка та її варіації, пропускна здатність, максимальний час відновлення мережі після аварій тощо);
 - методи вимірювання вищезазначених параметрів;
 - штрафні санкції за незабезпечення необхідного рівня QoS;
 - будь-які інші додаткові статті за обоюсторонньою згодою.

У цілому концепція укладання угоди по QoS у службі IP є ієрархічною моделлю (рис.1.1).

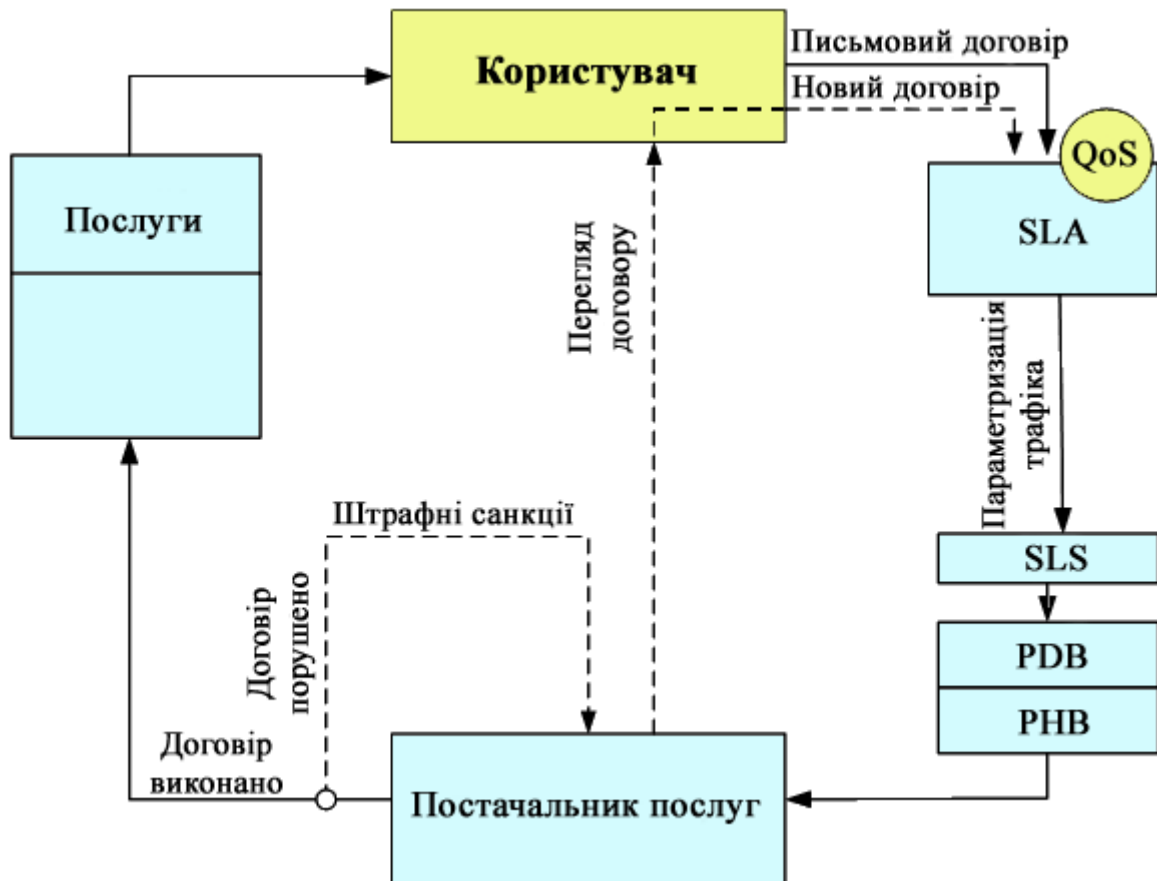


Рисунок 1.1. Концепція укладання договору щодо якості обслуговування

Договір SLA у моделі займає найвищий рівень абстракції в специфікації послуги. Параметризація трафіка також виділяється в самостійну підмножину SLS (Service Level Specification). При статичному

SLS користувач може передавати дані в будь-який час. При динамічному SLS користувач повинен використовувати сигнальний протокол для запиту необхідних ресурсів мережі та обробки запитів SLS. Блок PNB (Per-NP Behavior) являє собою комбінацію функцій покрокової маршрутизації, класифікації, обробки черг і методів відкидання пакетів на кожному кроці. Блок PDB (Per-Domain Behavior) реалізує концепцію покрокової маршрутизації на рівні домену.

Кожний тип PDB має кількісні та якісні атрибути, які можуть використовуватися для оцінки параметрів обслуговування пакетів заданого типу PDB. Атрибути обчислюються та вимірюються практичним шляхом і описують такі параметри, як швидкість примусового відкидання пакетів, пропускну здатність, верхнє та нижнє значення параметра затримки за певний проміжок часу. Атрибути бувають довгострокові й короткострокові. Довгострокові характеризують агрегований трафік за досить великий проміжок часу, короткострокові описують допустимі флуктуації параметрів відносно середніх значень.

На рис.1.2 показано найпростішу бізнес-модель взаємин між оператором мережі, провайдером послуг і кінцевим користувачем. Взаємовідношення між ними визначають дві угоди: SLA1 і SLA2.

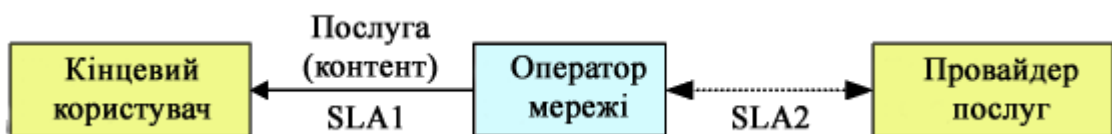


Рисунок 1.2. Бізнес-модель взаємин між оператором мережі, провайдером послуг і кінцевим користувачем

Функції і функціональні можливості систем IoT своєчасно були враховані при проектуванні мереж стільникового зв'язку стандарту 5G. Саме різноманітність вимог до IoT і визначає проблеми управління якістю їх обслуговування. Багато досліджень показують [94], що 5G є ключовим

драйвером IoT через його технології, які враховують різноманітність вимог IoT та пропонують варіанти вирішення проблем управління якістю обслуговування пристроїв IoT. Крім того, забезпечення надійного підключення для пристроїв IoT є завданням, пов'язаним з координацією та інтеграцією технологій, таких як гетерогенні мережі (HetNet), MIMO (Multiple Input Multiple Output), міліметрові хвилі (mmWave), зв'язок між пристроями (D2D), програмно-конфігурована мережа (SDN), віртуалізація мережевих функцій (NFV). Короткий опис цих технологій наведений нижче.

Зв'язок між пристроями. Основна ідея зв'язку між пристроями (D2D) полягає в тому, щоб дозволити двом пристроям зв'язуватися один з одним без проміжної базової станції. Технологія 5G дозволяє підтримувати багато додатків IoT, які вимагають прямого зв'язку [94]. Використання ліцензованого спектру в D2D-зв'язку покращує якість обслуговування за рахунок збільшення швидкості передачі даних і зменшення затримки.

HetNet є перспективною технікою для забезпечення бездротового покриття та високої пропускної здатності в бездротових мережах 5G. Це багаторівнева система, в якій вузли в різних рівнях мають різні характеристики, такі як потужність передачі, розмір покриття та технології радіодоступу [177].

MIMO Multiple Input Multiple Output - системи зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами (див. рис. 1.3).

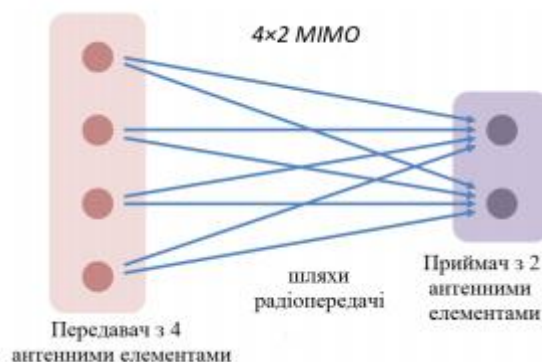


Рисунок 1.3. Приклад системи зв'язку MIMO

Використання MIMO дозволяє проводити просторову і часову обробку сигналів, ефективніше використовувати випромінювану передавачем потужність і знижувати негативний вплив завад. Використовуючи велику кількість антен на базовій станції, MIMO можуть забезпечити високі енергоефективність і ефективність спектра, для підтримки більшої кількості користувачів одночасно. Велика кількість антен на базовій станції може значно поліпшити пропускну здатність, енергоефективність і перенести більшу частину обробки сигналів і обчислення з терміналів користувача на базову станцію [94]. Більш того, MIMO можуть поліпшити безпеку зв'язку.

Програмно-конфігурована мережа (Software Defined Networking — SDN) — це віртуалізована мережа для передавання даних, в якій шар менеджменту (контролю або управління) мережею (Management Plane) відокремлений від пристроїв передавання даних і реалізується програмним шляхом. У мережах типу SDN вся логіка управління покладається на контролери, здатні відстежувати роботу всієї мережі [94].

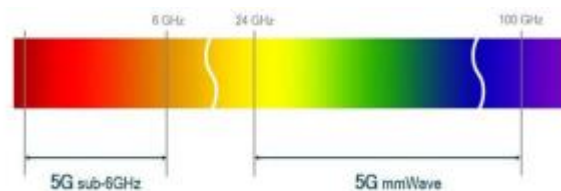


Рисунок 1.4. Спектр mmWave [111]

Технологія міліметрових хвиль. Однією з багатообіцяючих технологій, які істотно впливають на підвищення пропускну здатності мобільного зв'язку, є використання міліметрових смуг частот. Смуги частот в мм-діапазоні становлять від 30 до 300 ГГц (рис.1.4). Крім того, несучі частоти мм-хвиль збільшують швидкості передачі даних, забезпечуючи великий розподіл смуги пропускання. Що стосується додатків IoT, використання мм-хвилі може забезпечити високу швидкість передачі даних для додатків з великою пропускну здатністю.

Ретранслятори. Ретрансляційну мережу можна розглядати як топологію

мережі, яка використовується головним чином у бездротовій мережі для підвищення її продуктивності. Ідея ретрансляторів полягає в тому, щоб мати ретрансляційний вузол між декількома користувачами. Розміщення ретрансляційних вузлів в областях, де рівень сигналу низький, дає змогу збільшити швидкість передачі даних. Нарешті, у деяких випадках кілька користувачів переміщуються разом з одного пункту до іншого, і це вимагає функції мобільності, яка підтримується спільно розташованими ретрансляційними вузлами [23]. У термінах систем IoT ретрансляція є ключовою технологією, яка забезпечує масштабованість для додатків IoT. У разі наявності виду трафіку через одну базову станцію, пристрої IoT можуть бути підключені до декількох ретрансляційних станцій, що, у свою чергу, забезпечує кращу можливість з'єднання і покриття.

Безпека. Завдяки природі широкомовної передачі і обмеженої пропускної здатності бездротового зв'язку, можливо, але важко забезпечити такі функції безпеки, як аутентифікація, цілісність і конфіденційність. Засоби захисту голосу і даних забезпечуються на основі традиційної архітектури безпеки з такими функціями, як управління ідентифікацією користувача, взаємні аутентифікації між мережею та користувальницьким обладнанням, захист каналу зв'язку і так далі. Проводяться науково-дослідні роботи, пов'язані з технологіями, застосованими в 5G, де за допомогою нової архітектури усуваються недоліки безпеки в управлінні, ідентифікації та гнучкої аутентифікації [91, 172, 173].

У бездротовій мережі 5G очікуються рішення проблем безпеки, завдяки застосуванню таких технологій, як HetNet, D2D, MIMO, SDN.

1.1. Актуальність проблематики

Термін «Інтернет речей» був введений Кевіном Ештоном у 1999 році. Ештон ввів цей термін, щоб проілюструвати можливості радіочастотної ідентифікації (RFID), яка використовується в корпоративних системах

поставок, щоб порахувати і відстежити товари без потреби в людському втручанні [181]. IoT розвинувся від конвергенції бездротових технологій, мікроелектромеханічних систем, мікросервісів і Інтернету. Конвергенція допомогла зруйнувати кордони між операційною технологією та інформаційними технологіями, що дозволило проаналізувати неструктуровані машинно-генеровані дані для отримання зрозумілих даних для покращення. Екосистема IoT складається з інтелектуальних пристроїв із підтримкою Інтернету, які використовують вбудовані процесори, сенсори та комунікаційне обладнання для збору, передачі та дії даних, які вони отримують у своїх середовищах. Пристрої IoT використовують дані датчиків, які збирають дані, підключившись до шлюзу IP або іншого пристрою краю, де дані відправляються до хмари для аналізу або для локального аналізу. Іноді ці пристрої спілкуються з іншими відповідними пристроями та впливають на інформацію, яку вони отримують один від одного. Пристрої виконують більшу частину роботи без втручання людини, хоча люди можуть взаємодіяти з пристроями, наприклад, щоб встановити їх, дати їм інструкції або отримати доступ до даних. Протоколи підключення, мереж і комунікацій, що використовуються з цими пристроями з підтримкою Інтернету, багато в чому залежать від конкретних розгорнутих додатків IoT. «Інтернет речей» – це мережа, в якій можуть взаємодіяти між собою усі прилади, якими ми користуємося щодня [179]. Обмінюючись даними, речі «спілкуються» один з одним. Це концепція комунікації об'єктів («речей»), які використовують технології для взаємодії між собою та з навколишнім середовищем. Також ця концепція передбачає виконання пристроями певних дій без втручання людини. Таким чином, інтернет речей – це система взаємопов'язаних обчислювальних пристроїв, механічних і цифрових машин, об'єктів, тварин або людей, які забезпечені унікальними ідентифікаторами і здатністю передавати дані по мережі, не вимагаючи від людини ні взаємодії з іншою людиною, ні з комп'ютером [172]. З 2008 році відбувся перехід від інтернету людей до інтернету речей. Кількість підключених до мережі предметів

перевищила кількість осіб. З цих пір попит на цю концепцію не спадає, а навіть зростає. Технології та програми IoT створюють фундаментальні зміни в нашому суспільстві [85, 92]. IoT може змінювати роботу транспортних засобів [98] та полегшувати функціональні можливості з автоматизованими процедурами [38]. IoT створює зв'язок між транспортними засобами, допомагаючи уникнути їх зіткнення [23]. IoT є результатом різноманітних технологій, що використовуються для осмислення [32], збору [7], дії, обробки [35], надходження [42], передавання [33], повідомлення [29], керування [8] та зберігання даних [90]. Існує багато факторів, що сприяють викликам, з якими стикаються зацікавлені сторони розробки технологій IoT, такі як: прийняття рішень на основі прозорості та «інтерпретації» [1]; точність і якість даних [47], які використовуються в алгоритмі впливу на рішення програми IoT; безпека, яка є критичною для інтегрованих технологій IoT [6, 9, 12, 26, 34, 172]; підзвітність [39, 97] – це ще один фактор, який необхідно враховувати для автономних систем IoT, заснованих на когнітивних і штучних технологіях, де речі управляються самостійно [15]; соціальні [59, 60, 68, 74, 79, 82, 83, 118, 151] та економічні наслідки [78, 84] технологій IoT на основі штучних [173] та когнітивних рішень, які відбуваються в економічних змінах за допомогою збільшення продуктивності; управління автономними системами IoT. Інтернет речей пропонує низку переваг для організацій, що дозволяє: контролювати свої загальні бізнеспроцеси; покращити досвід клієнтів; економити час і гроші; підвищити продуктивність працівників; інтегрувати та адаптувати бізнес-моделі; приймати кращі бізнес-рішення; і генерувати більше доходів. IoT заохочує компанії переосмислювати способи, якими вони підходять до свого бізнесу, промисловості та ринків, і надає їм інструменти для поліпшення своїх бізнесстратегій. Лідерами у розробці та впровадженні IoT є країни, в яких розвинена індустрія виробництва мікропроцесорів та вбудованих комп'ютерів – це США, Китай [120] та Південна Корея [146]. Також значний прогрес у цій галузі демонструють європейські країни та Японія [181]. В

Україні кількість пристроїв IoT збільшується з розвитком мобільної мережі від 2G до 5G. Запит на цю концепцію вже існує. Технології – на підході [55, 57, 71, 99]. В Україні вперше відбувся унікальний Міжнародний ЕКСПО-конгрес «Бізнес для Розумних Міст» [27], під час якого зокрема відзначалося, що розумне місто – це не тільки комплекс IT-технологій, це «розумний» спосіб життя загалом, а також управління міською інфраструктурою, в тому числі транспортною, інженерною, безпековою, екологічною, це електронне урядування та інші заходи, направлені на покращення міського середовища в різних сферах життя. Основною метою всього комплексу заходів є підвищення безпеки, комфорту проживання та якості самого життя для жителів міста. Згідно звіту [12], котрий провів McKinsey Centre для урядів щодо дослідження 15 провідних міст світу, встановлено, що орієнтовно 60 сучасних рішень для побудови розумних міст безпосередньо впливають на якість життя і дозволяють на 8-10% знизити смертність, на 20-35% підвищити реагування на надзвичайні ситуації, на 15-20% скоротити час в дорозі на роботу і навпаки, на 8-15% – знизити захворюваність а також на 10-15% знизити викиди парникових газів.

До основних нормативно-правових актів, що регулюють розробку та використання сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, у т.ч. IoT, при впровадженні електронного урядування можна віднести:

- Портал Європейської Комісії. Закони про Інтернет речей [124];
- Указ Президента України «Про першочергові завдання щодо впровадження новітніх інформаційних технологій» [135];
- Закон України «Про інформацію» [132];
- Закон України «Про Національну програму інформатизації» № [133];
- Закон України «Про основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007 – 2015 рр.» [134];
- Закон України «Про телекомунікації» [137];
- Закон України «Про захист персональних даних» [130, 131];
- Закон України «Про Національну програму інформатизації»;

- Закон України «Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки»;
- Закон України «Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах»;
- Закон України «Про державну підтримку розвитку індустрії програмної продукції»;
- Закон України «Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах» [129];
- постанова Кабінету Міністрів України «Про запровадження Національної системи індикаторів розвитку інформаційного суспільства» [127];
- постанова Кабінету Міністрів України «Положення про Державний реєстр баз персональних даних та порядок його ведення» [128];
- розпорядження Кабінету Міністрів України «Стратегія розвитку інформаційного суспільства в Україні, Стратегія сталого розвитку «Україна – 2020»»;
- розпорядження Кабінету Міністрів України «Стратегія реформування державного управління України на 2016-2020 роки»;
- розпорядження Кабінету Міністрів України «Концепція розвитку електронного урядування в Україні»;
- розпорядження Кабінету Міністрів України «Концепцію розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018-2020 роки»;
- розпорядження Кабінету Міністрів України «Концепція розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018—2020 роки та затвердження плану заходів щодо її реалізації» [136].

1.2. Аналіз перспективного напрямку розвитку мобільних мереж зв'язку.

2021 рік продемонстрував [162] зміцнення основних тенденцій розвитку ринків телекомунікацій, закладених у попередні роки, а саме:

- розширення покриття території України телекомунікаційними мережами

мобільного зв'язку четвертого покоління (4G);

- збільшення кількості активних ідентифікаційних телекомунікаційних карток мереж мобільного зв'язку, з яких було здійснено доступ до мережі Інтернет;
- збільшення кількості користувачів сучасних електронних сервісів в різних сферах цифрової економіки та цифрового суспільства: e-Gov, e-Health, e-освіта, e-демократія, e-Квиток, bank-ID, mobile-ID, платіжні сервіси Google Pay, Apple Pay тощо;
- зростання попиту споживачів на послуги міжмашинної взаємодії (machine-to-machine, M2M) та послуги Інтернету речей (Internet of Things, IoT) суттєве збільшення кількості активних користувачів послуг доступу до мережі Інтернет (ріст склав майже 32%) та зростання обсягів споживання Інтернет-трафіку.

Крім того, оператори мобільного зв'язку активно впроваджували технологічні інновації: запустили приватні мережі LTE, тестові зони 5G, розширили доступ до мережі IoT, що призвело до збільшення кількості споживачів таких послуг.

Також зросла кількість операторів мобільного зв'язку, які започаткували надання телекомунікаційних послуг з використанням нового типу ідентифікаційних телекомунікаційних карток eSIM.

Серед ключових пріоритетів на 2022-2023 роки НКЕК виділяє:

- забезпечення виконання заходів, пов'язаних з реалізацією інтеграції України до ЄС;
- розробка та реалізація перспективного плану відбудови та розвитку електронних комунікаційних мереж та об'єктів поштового зв'язку на територіях, які постраждали внаслідок ведення бойових дій, в тому числі за рахунок міжнародної допомоги;
- участь у реалізації Плану заходів щодо підвищення якості послуг мобільного зв'язку;
- розробка та впровадження елементів Електронної регуляторної платформи

тощо.

На рис.1.5 показана модель системи, яка пропонує проектувати мережеву архітектуру для мобільних систем 5G, яка є всією IP-моделлю для сумісності бездротових і мобільних мереж. Система складається з користувальницького терміналу (який відіграє вирішальну роль у новій архітектурі) та ряду незалежних технологій автономного радіодоступу. У межах кожного з терміналів кожна з технологій радіодоступу розглядається як IP-зв'язок із зовнішнім світом Інтернету.

Однак для кожної технології радіодоступу (RAT) у мобільному терміналі повинен бути різний радіоінтерфейс. Наприклад, якщо ми хочемо отримати доступ до чотирьох різних RAT, нам потрібно мати чотири різних інтерфейси, що мають особливий доступ, в мобільному терміналі, і щоб вони були активними одночасно, щоб мати цю архітектуру функціональною [19].

Перші два рівні OSI (зв'язок даних та фізичний рівень) визначають технології радіодоступу, завдяки яким забезпечується доступ до Інтернету з більш-менш механізмами підтримки QoS, що додатково залежить від технології доступу (наприклад, 3G та WiMAX мають явну підтримку QoS, а WLAN не має).

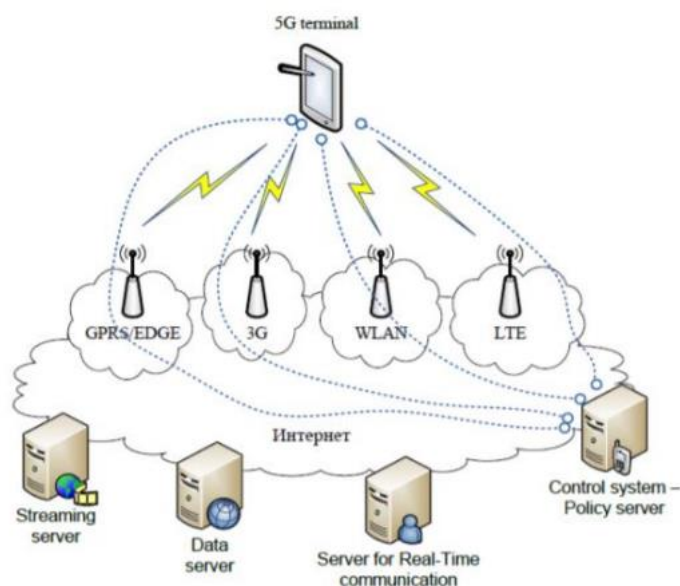


Рисунок 1.5. Модель системи мобільного зв'язку 5G

Потім над OSI-1 і шари OSI-2 - це мережевий рівень, і цей рівень є IP (Інтернет-протокол) у сучасному світі комунікацій - IPv4 або IPv6, незалежно від технології радіодоступу.

Мета IP – забезпечити достатню кількість контрольних даних (у заголовку IP) для правильної маршрутизації IP-пакетів, що належать до певного з'єднання додатків - сеансів між клієнтськими програмами та серверами десь в Інтернеті. Маршрутизація пакетів повинна проводитися відповідно до встановленої політики користувача [19].

Так як мережі п'ятого покоління функціонують на основі четвертого покоління, то спочатку потрібно пояснити, як функціонує мережа LTE Advanced, потім - вивести припущення про архітектурні відмінності мереж п'ятого покоління. Мережа LTE складається з двох систем - базової мережі, SystemArchitecture Evolution або Evolved Packet Core, що складається з блоків управління мобільністю (MobilityManagementEntity), блоків користувальницької суті (UserPlaneEntity), службових і пакетних шлюзів, та мережі радіо-доступу (evolved UMTS Terrestrialradioaccess network, E-UTRAN), що складається тільки з базових станцій. У попередньому поколінні зв'язку в архітектуру мережі радіо-доступу входить контролер радіомережі, Radio Network Controller, до функції якого входив процес встановлення і переривання з'єднань абонентів, процес хендвера (передачі абонента від однієї базової станції до іншої), шифрування даних користувачів, визначення рівня контролю якості. У мережах LTE всі ці функції покладені на базові станції.

Мережу мобільного зв'язку 5-го покоління відповідно до технічних специфікацій 3GPP утворюють дві мережі (рис.1.6):

- мережа радіодоступу NG-RAN і
- базову мережу 5G Core.

Мережа радіодоступу NG-RAN може включати сукупність базових станцій (БС), що складаються з [17]:

- БС gNB, радіоінтерфейс яких використовує технологію доступу 5-го

покоління NR (NR Radio Access);

– БС ng-gNB, радіоінтерфейс яких використовує технологію доступу LTE (E UTRA).

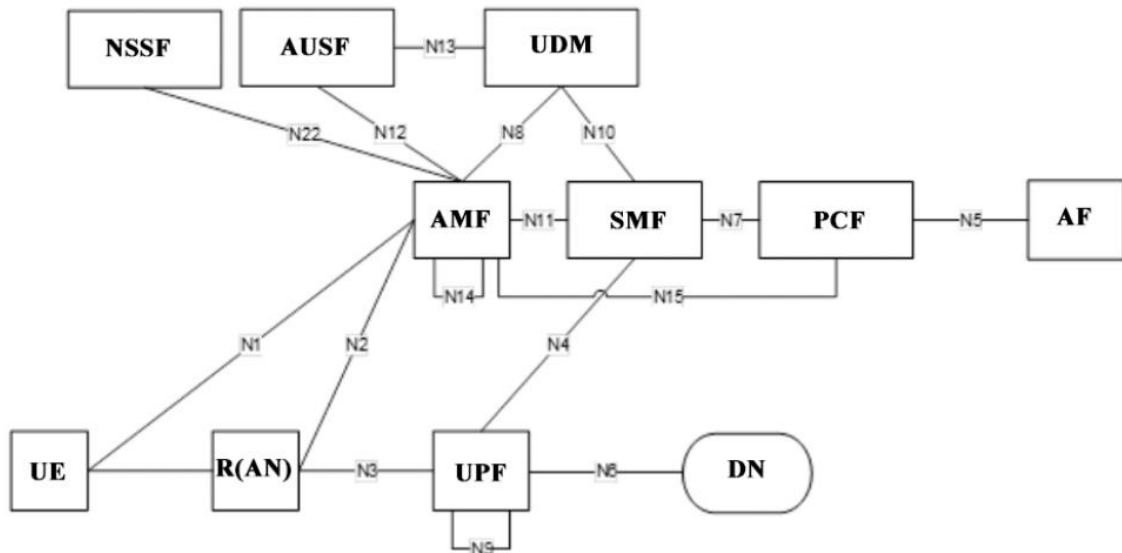


Рисунок 1.6. Архітектура мережі мобільного зв'язку 5G

Базові станції будуть взаємодіяти між собою по інтерфейсу Xn, а також з базовою мережею 5G Core по інтерфейсів NG: по інтерфейсу N2 – з модулем управління доступом і мобільністю AMF, по інтерфейсу N3 – з функціональними модулями площі користувача UPF. Архітектура базової мережі 5G Core включає сукупність функціональних модулів базової мережі та мережевих інтерфейсів N1-N15, що з'єднують ці модулі. Побудова сервісно-орієнтованої архітектури (SBA) базової мережі 5G Core визначено в Технічній специфікації TS 23.501 «Системна архітектура для системи 5G» Релізу 15.

Отже, відповідно до специфікації 3GPP TS 38.300 version 15.3. 1 Release 15, загальна будова мереж п'ятого покоління будуються на основі технології New Radio і будуть розділені на дві частини, як і у попереднього покоління: 5GC (Core Network) тобто базову мережу і NG-RAN (NextGeneration Radio Access Network), то є мережа радіо-доступу наступного покоління. Базова мережа повинна складатися з двох основних пристроїв, які

поділяють службові і призначені для користувача функції. Ці пристрої так і називаються, «функціями»: AMF (Access and MobilityManagementFunction), функція, що відповідає за надання доступу та управлінням підтримки сигналу мережі при переміщенні абонента; UPF (UserPlaneFunction), що відповідає за передачу призначеного для користувача трафіку.

Функціональні модулі базової мережі 5G Core призначені для вирішення наступних завдань:

- управління сервером аутентифікації AUSF;
- управління доступом і мобільністю AMF;
- управління сесіями SMF;
- передача даних абонентів UPF;
- вибір мережевого шару NSSF;
- управління уніфікованими даними UDM;
- управління політиками PCF;
- зберігання структурованих мережевих даних SDSF;
- зберігання неструктурованих мережевих даних UDSF;
- управління мережею на основі додатків AF;
- забезпечення взаємодії мережі з зовнішніми функціями NEF;
- управління репозиторієм (базою даних) мережевих функцій NRF.

Додатково, в архітектуру мережі включені інші «функції»: SMF (SessionManagementfunction), функція управління сесіями, розподіляє IP-адреси для користувача пристроїв, управляє і стежить трафіком, що проходить через функцію користувальницької площині вибирає UPF для переміщення трафіку до місця призначення; AUSF (Authentication Server Function), функція сервера аутентифікації користувачького пристрою; UDM (UnifiedDataFunction), являє собою сховище реєстраційних даних, відомостей про безпеку і різних підписах абонента; PCF (PolicyControlFunction), функція управління політиками, що контролює єдину політику поведінки мережі та політику поведінки кожної площині мережі (користувальницької і службової); AF (ApplicationFunction), функція додатків, що виконує запити

до функції управління сесіями, також має доступ до управління зарядом батареї пристрою.

Головною особливістю базової мережі 5G стане можливість формування і використання мережевих шарів для різних послуг і підтримки паралельно до восьми шарів на один абонентський пристрій. Мережевий шар, що утворюється на основі технології віртуалізації NFV, дозволяє динамічно створювати логічну мережу E2E з використанням мереж радіодоступу 5G, базової мережі 5G Core і модулів міжмережевої взаємодії для послуги.

Для надання абоненту послуг певного сегмента планується використовувати мережевий рівень мережі 5G, що включає в себе необхідний набір віртуальних мережевих функцій VNF [23]. Один абонентський термінал може використовувати до восьми таких мережевих шарів. Особливість полягає в тому, що модуль управління доступом і мобільністю AMF повинен бути загальним для всіх мережевих рівнів, що обслуговують абонентський термінал. Кожен мережевий рівень характеризується ідентифікатором сегмента S-NSSAI (Single Network Slice Selection Assistance Information), а дані про до восьми мережевих шарів групуються в NSSAI (Network Slice Selection Assistance Information), що підтримує інформацію. Дані NSSAI генеруються окремо для різних мобільних мереж в залежності від PLMN-id (Public Land Mobile Network Identifier).

Процес роботи в мережі п'ятого покоління приблизно такий: призначений для користувача пристрій виявляє мережу за допомогою вбудованої антени (цей етап залишається незмінним ще з другого покоління і технології GSM), мережа, тобто AMF через базову станцію запитує службові дані телефону. Користувача пристрій посилає свої реєстраційні дані через базову станцію в функцію доступу і управління мобільністю (AMF), ця функція зіставляє реєстраційні дані пристрою з сервером, на якому містяться дані всіх абонентів і якщо надані дані збігаються, доступ в мережу

дозволяється. Після реєстрації для користувача пристрій отримує доступ до URF, а через неї - до послуг мережі.

Тим часом, основне зростання трафіку і доходів відбувається не в секторі пристроїв людей, а в секторі пристроїв інтернету речей, який є однією з базових цілей функціоналу 5G (рис.1.7).

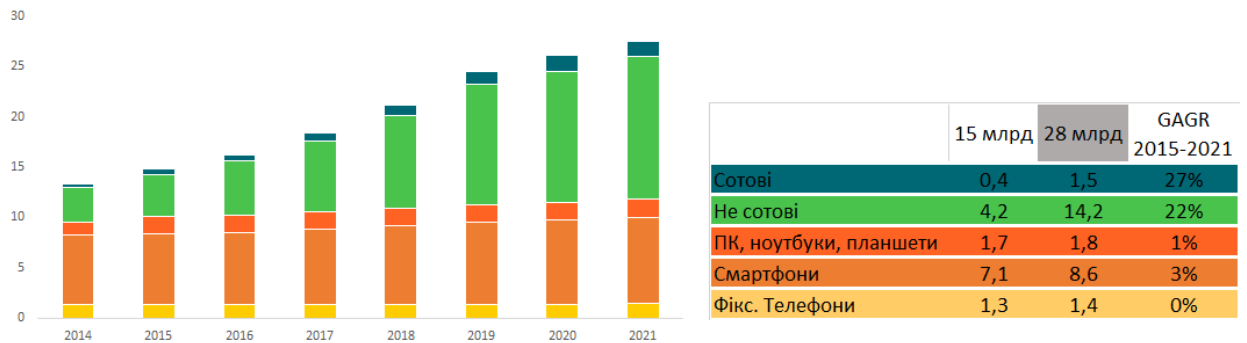


Рисунок 1.7. Зростання числа підключених до мережі пристроїв

Тому, мережі 5G можна вважати однією з необхідних складових частин цифрової трансформації і цифрової економіки.

Початкові версії 5G були розроблені в той же час, коли IoT почав ставати явищем. Понад 8 мільярдів пристроїв IoT використовувались у всьому світі у 2017 році, що на 31 % більше, ніж у 2016 році, а загальна кількість у 2020 році вже перевищила 20 мільярдів. Незважаючи на те, що багато додатків IoT мають низьку пропускну спроможність, чітке число збільшує величезну навантаженість трафіку для мобільних мереж.

Хоча такі можливості, як ультранизька затримка та надвисока щільність пристрою, роблять 5G ідеальними для додатків IoT, новий стандарт витратить перші кілька років на живлення смартфонів. Цей фокус значною мірою пояснюється тим, що ринок смартфонів величезний і тому, що споживачі зазвичай замінюють свій пристрій приблизно кожні два роки. Ще одна причина полягає в тому, що (рис.1.8) смартфони продовжуватимуть здійснювати більшість трафіку мобільних даних принаймні до 2022 року, а

5G надає операторам нові, дуже потрібні можливості для того, щоб бути в курсі цього попиту. Нарешті, більшість додатків IoT дуже чутливі до ціни, і 5G буде потрібно кілька років, щоб зменшити криву витрат до того, що його модулі будуть конкурувати з версіями 4G.

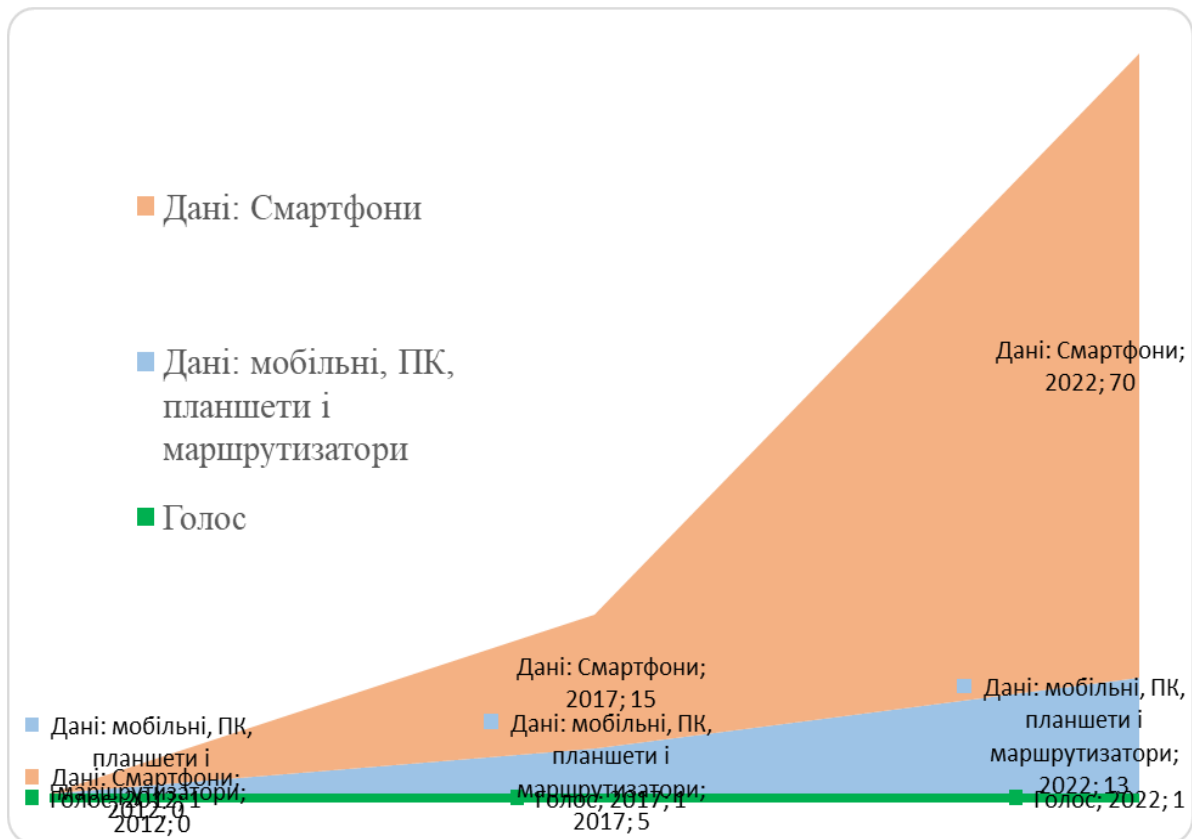


Рисунок 1.8. Залежність об'єму передачі трафіка мобільних даних з часом

Сфера, яка вимагає масивного зв'язку, — безпілотні літаки (БПЛА) або "дрони". Сьогодні легкими дронами вже нікого не здивуєш різноманітністю цілей – від розваг до спеціалізованих військових. З їх допомогою можливо знімати видовищні відео, вести розвідку рельєфу місцевості, здійснювати порятунок людей, перевезення вантажів і т.д. Але практично всі вони управляються людиною безпосередньо через прямий надійний бездротовий зв'язок із неліцензованою частотою.

У зв'язку з впровадженням 5G в прогресивних країнах вже сьогодні на цю тему приділена серйозна увага з боку контролюючих органів, в зв'язку з

чим проводяться роботи зі стандартизації та безпеки в цій сфері. Наприклад, в Європі є 5G PPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) на основі Європейської Комісії та представників інформаційно-комунікаційної галузі (оператори, провайдери, інститути, малий і середній бізнес) з Великобританії, Франції, Швейцарії, Австрії, Фінляндії, Греції, Польщі та Естонії. Державно-приватний Партнерство з 5G PPP запропонує рішення, архітектури, технології та стандарти для БПЛА. У цій державній ініціативі Європейський Союз бачить один із шляхів зміцнення свого технологічного лідерства на світовій арені.

Де є стандарти, що регулюють масове використання дронів, систем штучного інтелекту, надійного, постійного і швидкого бездротового каналу зв'язку 5G, для цілого вулика дронів можна запропонувати нові ринки і послуги в різних сферах: від доставки їжі з магазинів до гасіння пожеж, і все в світовому масштабі, а не в особливих випадках.

Таким чином, основним користувачеві для мережі 5G в наступних роках слід чекати додатки IoT.

1.3. Структура рівня користувача мережі 5G

Як було зазначено вище, мережі зв'язку 5G матимуть неоднорідну структуру. Неоднорідна структура вже має місце в сучасних мережах, в яких співіснують різні комунікаційні технології. У контексті завдань, які необхідно виконати в роботі, найважливішим є неоднорідна структура мереж зв'язку на рівні доступу, тобто власне мереж 5G. Вже сьогодні практично всі 5G забезпечують співіснування технологій різних поколінь від 2G до 4G. Поряд з цим відбувається і інтеграція в мережеву інфраструктуру WLAN, які вже потенційно здатні вирішувати проблеми розвантаження трафіку. Інтеграція технологій IoT також відбувається в мережах четвертого покоління, що виражається у використанні технологій NB-IoT для обслуговування IoT-трафіку. Однак набір технологій, доступних для

побудови IoT, цим не обмежується. Практично всі доступні технології організації бездротових мереж зв'язку можуть знайти своє застосування в реалізації різних ділянок IoT-мереж. В першу чергу це стосується технологій, в яких використовуються неліцензійні смуги частот і передавачі малої потужності. Цілком очевидно, що при високій щільності інтернету речей, тобто вузлів мережі, не має сенсу використовувати високі ємності для передачі сигналів. Більш того, це може привести до збільшення взаємних перешкод і, як наслідок, до зниження пропускної здатності таких мереж. Більш імовірно, що в мережах з високою і надвисокою щільністю пристроїв буде знижена потужність передавачів і розвиток технологій зв'язку на короткі відстані. Однак, незважаючи на ймовірну появу мереж високої щільності, все ще існує ймовірність наявності мереж з низькою щільністю вузлів на ділянках з низьким рівнем розвитку об'єктів зв'язку і низькою щільністю населення. Відмінною рисою перспективних мереж зв'язку є раціональне використання доступних засобів з метою підвищення ефективності вирішення поставленого завдання. Це досягається за рахунок наявності неоднорідної структури. Саме така структура дає можливість оптимально або раціонально перерозподіляти ресурси з метою надання певних послуг зв'язку. Зокрема, це забезпечується можливістю так званого розвантаження транспорту. Такі завдання вирішуються оптимальним або раціональним вибором способу обслуговування виробленого в мережах трафіку. В даному випадку під методом обслуговування розуміється вибір мережі, побудованої за певною технологією, яка здатна забезпечити необхідні сервісні показники. Таким чином, потенційно будь-яка з технологій може бути задіяна в обслуговуванні трафіку. Звичайно, при цьому слід враховувати особливості доступних технологій і вимоги з боку сервісів. Зокрема, технологію побудови WLAN також можна розглядати як одну з технологій перспективної гетерогенної мережі, яка може використовуватися для обслуговування різних видів трафіку, включаючи IoT-трафік. Ряд проблем при побудові WLAN сформульовано в роботах [180, 187, 189].

WLAN потенційно здатний підключати та передавати пристрої IoT, а також інші, можливо, пристрої TI. У перспективній мережі п'ятого покоління використання IoT-мереж можна розглядати як один із способів розвантаження трафіку. Ряд проблем WLAN сформульовані в роботах [33, 102, 122, 138, 141, 142]. WLAN є найважливішим способом передачі розширень IoT.

Нижче наведено список цих технологій з коротким описом їх основних параметрів:

а) технології на основі IEEE 802.15.4:

- ZigBee (ZigBee Alliance);
- 6LoWPAN (RFC4944);
- WirelessHART (IEC 6259);

б) технологія на основі стандарту IEEE 802.15.1 (Bluetooth);

в) технології на основі сімейства стандартів IEEE 802.11:

- IEEE 802.11ah;
- IEEE 802.11(n) s;

г) технології, засновані на стандарті на основі стандарту IEEE 802.16e (WiMAX);

д) стандартні технології LPWAN:

- LoRa (Альянс LoRa);
- SigFox;
- NB-IoT;
- Weightless P.

Група стандартів LPWAN істотно відрізняється від інших стандартів можливістю побудови мережі набагато більшого, територіального, масштабу. Це досягається за рахунок застосування відповідних методів передачі і прийому сигналів. У завданнях, що вирішуються в даній роботі, такі параметри перерахованих вище технологій, як:

- максимально досяжна швидкість передачі даних;
- розмір зони зв'язку (відстань передачі);

- діапазон робочих частот.

IEEE 802.15.4 - мережевий стандарт, який описує фізичний рівень (PHY) та протоколи контролю доступу до медіа (MAC) моделі OSI. На даний момент це єдиний низькошвидкісний енергозберігаючий протокол для побудови бездротових сенсорних мереж [20]. Частотний діапазон для пристроїв цього стандарту визначається як 868,0-868,6 МГц в Європі (1 канал зв'язку), 902-928 МГц в Північній Америці (30 каналів зв'язку), 2400-2483,5 МГц в інших країнах світу, також в Україні (всього 16 каналів). Особливостями стандарту є досяжні швидкості передачі до 256 Кбіт/с в діапазоні частот 2400-2483,5 МГц. Пристрої IEEE 802.15.4 класифікуються за типами на два основних типи:

- пристрої з обмеженою функціональністю (RFD Reduced Function Device);
- пристрої, які мають більше функцій, ніж RFD. Як правило, це маршрутизатори або мережеві FFD координатори (Full Function Device).

Цей стандарт підтримує наступні структури для побудови мережі зв'язку:

- point-to-point;
- star.

У цьому стандарті існує два типи вузлів:

- Coordinator PAN - мережевий координатор (FDD-пристрої та пристрої End Device);
- цільовим пристроєм можуть бути як пристрої з функціями FFD, так і RFD.

На основі стандарту IEEE 802.15.4 було розроблено багато стандартів для побудови мереж IoT. Ось три з них:

- WirelessHART. Стандарт призначений для бездротової передачі даних, заснованої на протоколі HART. Цей стандарт забезпечує перетворення даних, отриманих від вузлів мережі, і їх передачу в мережу для можливої подальшої обробки. Даний протокол, поряд з основними характеристиками і параметрами мереж на базі IEEE 802.15.4, має деякі специфічні параметри:

- підтримує структуру сіткової мережі на додаток до точкових і зоряних структур;
- підтримує функції відновлення та самоорганізації мережі;
- мережеві пристрої можуть здійснювати зв'язок на відстані від 0 до 300 метрів один від одного;
- збір даних з датчиків;

У мережі є такі типи пристроїв:

- шлюз (Gateway), який забезпечує взаємодію з іншими мережами;
- пристрій, який збирає дані з датчиків і передає їх шлюзу (Адаптеру);
- польовий пристрій, який не має порту взаємодії з провідними пристроями HART.

Бездротові мережі на базі HART широко використовуються в промисловості і стандартизовані Міжнародною електротехнічною комісією (IEC 62591).

6LoWPAN – мережевий стандарт, який призначений для взаємодії між пристроями IEEE 802.15.4 за протоколом маршрутизації IPv6. Протокол використовується для підключення пристроїв мережевого стандарту IEEE 802.15.4 до мережі Інтернет. До протоколу 6LoWPAN були додані наступні можливості:

- підтримка структури mesh-мережі;
- підтримка функцій відновлення та здійснення самоорганізації населення; ZigBee.

Ця технологія реалізує власні протоколи на мережевому і прикладному рівні. На рівні MAC, а також на рівні РНУ він використовує 43 протоколи, визначені документом IEEE 802.15.4. Ця технологія часто використовується в побутовій електроніці і периферії, в медичних приладах і т.д.

Технологія ZigBee має всі параметри стандарту IEEE 802.15.4, до яких відносяться:

- підтримка структури підключеної мережі крім точково-точкової і зоряної структур;

- підтримка функцій відновлення мережі та самоорганізації.

У мережі цього стандарту можливі наступні типи пристроїв:

- термінальний пристрій;
- маршрутизатор;
- координатор.

IEEE 802.15.1 (Bluetooth) – однорангова і динамічна мережа, яка може бути побудована на обмеженій території або в обмеженому просторі. Кількість вузлів мережі може досягати 80. Управління мережею децентралізовано. При використанні цієї технології в мережах IoT потрібна загальна точка доступу, яка реалізує управління мережею і функції збору і обробки даних. У 2013 році була випущена специфікація протоколу Bluetooth Low Energy 4.1. Він має наступні характеристики:

- підтримує два режими передачі: низькошвидкісний до 1 Мбіт/с і швидкісний до 3 Мбіт/с;
- зона зв'язку від 0 до 30 метрів;
- підтримує IPv6-адресацію;
- підтримує режим низького енергоспоживання;
- діапазон частот 2,4-2,4835 ГГц;
- підтримує зіркові і точкові структури;
- не підтримує функції відновлення та самоорганізації;
- специфікація 4.2 стверджує підтримку спеціальних мереж та mesh-структур.

Bluetooth з низьким енергоспоживанням (Bluetooth Low Energy, Bluetooth LE) або Bluetooth Smart®, базується на специфікаціях Bluetooth 4.x та 5.x. Подібно до Bluetooth, Bluetooth LE працює в діапазоні 2,4 ГГц. Прихована відмінність полягає в тому, що Bluetooth Low Energy залишається в сплячому режимі, якщо з'єднання не ініціюється. Фактичний час з'єднання триває лише кілька мілісекунд, на відміну від Bluetooth, який підключається протягом декількох секунд або декількох годин за раз. Ці короткі з'єднання необхідні, оскільки швидкість передачі даних значно вища (1 Мб в секунду). Приклади використання Bluetooth LE:

- моніторинг артеріального тиску;
- пристрої «Фітбіт»;
- промислові датчики моніторингу;
- цільові акції на основі географії;
- додатки для громадського транспорту та ін.

Стандарт IEEE 802.15.6 використовується для організації мереж BAN (Body Area Network), які складаються з безлічі сенсорних носіїв або імплантуються в тілі людини або розташовані в безпосередній близькості від нього. Кількість вузлів мережі до 256 вузлів. Протокол підтримується в медичних і спортивних додатках. Всі вузли мережі повинні мати низьку потужність передавача. Можливі три типи вузлів:

- імплантовані вузли;
- носимі вузли;
- зовнішні вузли.

Основні параметри мережі IEEE 802.15.6:

- швидкість передачі до 10 Мбіт/с;
- зона зв'язку вузла до 5 м;
- потужність передавача до 1 мВт;
- частота 2,85–10,6 ГГц (Україна), 3,1–10,6 ГГц (США), 6–8 ГГц (Європа);
- підтримувані структури: зоряна і стільникова структура;

Стандарт підтримує наступні типи вузлів:

- координатор або шлюз;
- кінцеві вузли;
- транзитні вузли.

Стандарти IEEE 802.11 (Wi-Fi) - це сімейство стандартів, які призначені для побудови локального бездротового зв'язку між пристроями, включаючи створення WLAN. Діапазон частот: 0,9, 2,4, 3,6 і 5 ГГц. В даний час стандарт IEEE 802.11-2012 [18] визначає організацію каналів зв'язку WLAN, які працюють під контролем протоколів IEEE 802.11n і IEEE 802.11s [19, 86]. Стандарт IEEE 802.11ah застосовується для зв'язку на короткі

відстані та з'єднання M2M. Основні параметри:

- частота 0,9 ГГц;
- до 26 частотних каналів;
- досяжна швидкість передачі 40 Мбіт/с;
- дальність зв'язку 1,2 км, можливе збільшення до 10 км при використанні збільшення потужності передавача;
- точка доступу дозволяє підключити до 8191 пристрою.

IEEE 802.11s призначений для організації WLAN і підтримує сітчасту структуру [63]. Даний стандарт не вважається самостійним рішенням, а є програмним доповненням для стандартів IEEE 802.11b/g/n. Основні параметри [19]:

- досяжна швидкість передачі 600 Мбіт/с;
- діапазони частот 2,4–2,5, 5,0 ГГц;
- ширина каналу зв'язку - 20 або 40 МГц;
- дальність зв'язку 250 метрів, з використанням підсилювача і антенних пристроїв – до 10 км;
- підтримує структури: точка-точка, зірка і сітка;
- пристроями в мережі можуть бути точки доступу, які взаємодіють з усіма пристроями бездротової мережі, що самоорганізується, та з mesh топологією; кінцеві вузли; стільникові пристрої, які підключаються до інших вузлів в межах однієї стільникової мережі.

Стандарт IEEE 802.16 призначений для забезпечення мобільного бездротового зв'язку. Його можна використовувати як для стаціонарних, так і для мобільних пристроїв. Діапазон частот: 2,3 ГГц, 2,5 ГГц, 3,3 ГГц, 3,4-3,8 ГГц. Стандарт забезпечує відносно низьку швидкість передачі даних на відносно великі відстані, в порівнянні з технологіями, використовуваними для організації мереж рівня WLAN і PAN. Ці технології найбільш застосовні до додатків телеметрії та інших додатків, які не критичні до часу і пропускної здатності.

LoRaWAN є стандартом для побудови енергоефективної бездротової

мережі відносно великого географічного масштабу (WAN). Цей стандарт дозволяє побудувати мережу для збору даних з термінальних вузлів. Стандарт розробляється робочою групою LoRa Alliance. Він являє собою відкритий протокол для мереж з великою кількістю вузлів. На фізичному рівні моделі VOS пристрою використовується модуляція LoRa, яка є патентом компанії Semtech. Основними параметрами цього стандарту є:

- частотний діапазон 868,8 МГц (Європа) 915 МГц (США) 433 МГц (Азія);
- ширина частотного каналу може мати такі значення (7,8; 10,4; 15,6; 20,8; 31,25; 41,7; 62,5; 125; 250; 500 кГц);
- дальність зв'язку до 100 км;
- досяжна швидкість 100 Кбіт/с;
- підтримується тільки зірчаста структура;
- складається з кінцевих вузлів і шлюзів.

Sigfox – технологія також є однією з технологій побудови мереж LPWAN. Тут використовується вузький діапазон частот, що дозволяє масштабувати мережу і забезпечувати її високу енергоефективність. Кінцеві вузли мережі можуть відправляти до 140 повідомлень в день. Основні характеристики:

- розмір повідомлення не перевищує 12 байт;
- діапазон частот 868,8 МГц (Європа) 915 МГц (США);
- ширина каналу 100 кГц;
- дальність зв'язку до 10 км;
- досяжна швидкість 100 біт/с;
- підтримує структуру мережі «зірка» і «точка-точка»;
- типи пристроїв: кінцеві вузли, базові станції.

Weightless також є стандартом для побудови мереж LPWAN. Стандарт був розроблений компанією Ubiiq, підтримує три типи протоколів: N, W і P. Кожен з типів протоколу дозволяє реалізувати різні варіанти побудови мережі. Протокол типу P - двонаправлена мережа, що підтримує велику кількість цільових пристроїв. Синхронність мережі дозволяє значно знизити

ймовірність втрат і зіткнень. Параметри:

- діапазони частот 169 / 433 / 470 / 780 / 868 / 915 / 923 МГц;
- ширина каналу 12,5 кГц;
- дальність зв'язку до 2 км по місту;
- підтримується тільки структура зірки;
- вузли складаються з базової станції і кінцевих вузлів.

NB-IoT – стандарт, який розроблений консорціумом 3GPP і відповідає вимогам мережі LPWAN. Стандарт дозволяє операторам мереж зв'язку інтегрувати технології Інтернету речей в традиційні технології стільникового зв'язку. NB-IoT забезпечує значну зону обслуговування та високоінтенсивне обслуговування трафіку. Цей стандарт також забезпечує високу енергоефективність, що дозволяє термінальним блокам з автономним живленням працювати до десяти років. Параметри:

- діапазон частот 700 / 800 / 900 МГц;
- ширина каналу 200 кГц;
- дальність зв'язку до 2 км по місту;
- швидкість передачі: UpLink до 144 Кбіт /с, DownLink до 200 Кбіт /с;
- підтримує тільки структуру зіркового типу;
- склад: базова станція і кінцеві вузли.

«Речами» в IoT можуть бути:

- точка доступу - пристрій бездротової мережі, який виконує роль порталу для підключення пристроїв до локальної мережі;
- пристрій - це одиниця фізичного обладнання або обладнання, яка забезпечує одну або кілька обчислювальних функцій всередині системи;
- маяки - невеликі передавачі, які підключаються до пристроїв з підтримкою Bluetooth і Bluetooth LE, таких як смартфони;
- шлюз - організатор зв'язку між двома комп'ютерами або пристроями, що дозволяє їм зрозуміти передачу даних та зв'язок один одного;
- концентратор - апаратний пристрій, який з'єднує інші пристрої передачі даних з центральною станцією;

- датчик - пристрій, який вимірює фізичний вхід зі свого середовища і перетворює його в дані, які можуть бути інтерпретовані або людиною, або машиною;
- приводи - компоненти, які відповідають за переміщення і управління механізмом або системою, наприклад, відкриття клапана;
- кіберфізичні системи - інтеграції обчислювальних, мережевих і фізичних процесів з циклами зворотного зв'язку, де фізичні процеси впливають на обчислення і навпаки;
- безконтактні технології, які дозволяють смарт-картці, мобільному телефону або іншому пристрою підключатися безпроводовим способом (без контакту) до електронного зчитувача, як правило, для здійснення платежу;
- цифрові двійники - цифрова копія фізичних активів, процесів, людей, місць, систем і пристроїв, які можуть бути використані для різних цілей і інтегрують історичні дані машини в цифрову модель;
- геозахист - використання технології GPS або RFID для створення віртуальної географічної межі, в якій можуть працювати пристрої;
- GIS (геоінформаційна система) - система, призначена для фіксації, маніпулювання, аналізу, управління та представлення просторових або географічних даних;
- GPS (глобальна система позиціонування) - технологія, створена урядом США, яка дозволяє надавати послуги визначення місцезнаходження;
- ГНСС (глобальна навігаційна супутникова система) - угруповання супутників, що подають сигнали з космосу, які передають дані про позиціонування і хронометраж на GNSS-приймачі;
- Haptics - технологія застосування тактильного відчуття і управління щодо взаємодії з комп'ютерними додатками;
- HAV (Hardware-Assisted Virtualisation) - апаратна віртуалізація з використанням фізичних компонентів комп'ютера для підтримки програмного забезпечення, яке створює віртуальні машини та керує ними;

- IMU (Inertial Measurement Unit, інерційна одиниця виміру) - пристрій, який вимірює та повідомляє про тіло або дрон (специфічну силу, кутову швидкість, а іноді й магнітне поле, що оточує тіло/дрон);
- лідар - технологія дистанційного зондування, яка використовує імпульс від лазера для збору вимірювань, які потім можуть бути використані для створення 3D-моделей та карт об'єктів та середовищ;
- мехатроніка - пристрої як електричних, так і механічних систем, що включають в себе поєднання робототехніки, електроніки, обчислювальної техніки, телекомунікацій, систем, управління та інженерії продукції;
- радар - система виявлення, яка використовує радіохвилі для визначення дальності, кута або швидкості об'єктів;
- телематика - метод моніторингу активу за допомогою GPS та бортової діагностики для запису рухів на комп'ютеризованій карті;
- eSIM - будована SIM-карта (також eUICC) є безпечним елементом, призначеним для віддаленого керування кількома підписками операторів мобільного зв'язку та відповідності специфікаціям GSMA;
- ICCID (ідентифікатор у карті з інтегральною мікросхемою) - унікальний серійний номер, вбудований на SIM-карту;
- IMSI (міжнародна ідентифікація абонента мобільного зв'язку) - унікальний номер, зазвичай п'ятнадцять цифр, пов'язаний з ідентифікацією пристрою, підключеного до GSM;
- модуль IoT - невеликий електронний пристрій, вбудований в об'єкти, машини та речі, які підключаються до бездротових мереж, які надсилають та отримують дані;
- модем - апаратний пристрій, що дозволяє комп'ютеру надсилати та отримувати дані по телефонній лінії або кабельному чи супутниковому з'єднанню;
- маршрутизатор - апаратний пристрій, призначений для прийому, аналізу та переміщення вхідних IP-пакетів в іншу мережу;

- СОК (модуль ідентифікації абонента) - смарт-картка, яка зберігається, зокрема посвідчення особи, розташування, номер телефону, дані авторизації мережі та ключі безпеки, інсталювані в безпроводовому пристрої.

Зв'язок IoT слід вибирати на основі ретельної оцінки характеристик кожного розгортання. Для деяких дуже високих швидкостей потрібне підключення з наднизькою затримкою. Це може призвести до прийняття стільникового зв'язку 5G або 4G IoT, але це рішення має бути збалансоване з імовірною вартістю та використанням енергії, яких вимагають ці технології. Для деяких простіших розгортань низькошвидкісні з'єднання, які не завжди майже включені, можуть бути ідеальними, вимагаючи менших акумуляторів і забезпечуючи підключення IoT економічно ефективно. Енергоефективність технології підключення має значний вплив на термін служби або цикл обслуговування пристроїв IoT, що покладаються на акумулятор або збір енергії, і залежить від дальності, топології та складності технології підключення. Загальне енергоспоживання пристрою також залежить від використання програми, наприклад, частоти та тривалості передачі повідомлення. Технології малого радіусу дії, такі як ZigBee, покладаються на сітчасту топологію для пересилання повідомлень з одного пристрою на інший через кілька стрибків. Таким чином, ZigBee може розширити своє покриття, але може швидше виснажувати батареї, оскільки окремий пристрій повинен постійно слухати і бути готовим до ретрансляції повідомлень. Технології широкої площі, такі як 2G, замість цього покладаються на топологію зірок і зберігають більшу частину інтелекту та складності на базовій станції, де джерело живлення не є обмежуючим фактором. Технології LPWA, такі як NB-IoT, ще більше зменшують споживання енергії, позбавляючи протоколу сигналізації та зменшуючи кількість накладних витрат до мінімального мінімуму, що забезпечує більш тривалий час автономної роботи. На додаток до основних технічних міркувань, розглянутих вище, існують і інші технічні особливості, які можуть бути дуже актуальними для певних застосувань.

Мобільність – у багатьох додатках IoT пристрій буде встановлено у фіксованому місці та з'єднано з однією точкою доступу протягом усього життя, але інші програми можуть вимагати, щоб пристрій працював, коли він рухається через покриття різних точок доступу. Хоча більшість технологій підтримують переміщення пристроїв до різних точок доступу, процес переміщення може бути таким же безпроблемним, як і в стільниковій мережі, або відбуватися лише через заплановані проміжки часу.

Позиціонування – місцезнаходження пристрою часто є цінною інформацією. Але відстеження GPS не завжди можливе через його обмежене покриття в приміщенні та додаткові витрати та складність. Тому нативна підтримка позиціонування є бажаною особливістю. Більшість технологій широкої площі можуть використовувати триангуляцію для визначення місця розташування пристрою, але точність досить обмежена для технологій з вузькою пропускнуою здатністю каналів і ситуацій, коли пристрій статичний без прямого шляху сигналу. Wi-Fi і Bluetooth постійно вдосконалюють свої можливості позиціонування, оскільки алгоритм стає все більш досконалим.

Затримка - низька затримка має вирішальне значення для додатків IoT, які покладаються на дистанційне керування та з мінімальним допуском затримки (затримки) передачі сигналу. Критичні програми з затримкою варіюються від простіших випадків, таких як обігрівачі автомобілів, до дуже складних випадків, таких як дистанційна хірургія, промислова автоматизація та автономне водіння.

Щільність пристрою – чим більше пристроїв підключено, тим важливіше для технології підключення мати можливість обробляти велику кількість з'єднань у певній області. Завдання полягає в тому, щоб забезпечити надійний зв'язок, мінімізуючи перешкоди між різними сигналами. Як правило, щільність пристрою в масивному контексті IoT (mIoT) розглядається в кількості пристроїв на квадратний кілометр.

1.4 Аналіз тенденцій розвитку Інтернету речей

Вибір цього напрямку в якості пріоритетного є наслідком прагнення людини до отримання будь-якої необхідної йому інформації і вміння управляти все більшою кількістю процесів. Реалізація концепції Інтернету речей (IoT) полягає в розробці засобів доступу до інформації. Загальний рівень розвитку основних телекомунікаційних технологій в світі досить високий. В країнах з розвиненим рівнем економіки рівень розвитку найбільш поширених технологій досягли насичення. Така ситуація призводить, з одного боку, до уповільнення зростання попиту на популярні послуги зв'язку, але з іншого - є стимулом для розвитку нових технологій і послуг, які повинні виступити каталізатором загального розвитку інформаційно-комунікаційних систем (ІКС).

Напрямки подальшого розвитку ІКС продиктовані прагненням людей освоювати все більш широкі сфери використання інформаційних технологій, що потенційно призводить до підвищення рівня доступності інформації. Безпосередній розвиток ІКС диктується розвитком людей для оволодіння всіма широкими сферами використання інформаційних технологій, а значить, підвищення доступності інформації. В умовах розвитку ІКС де-факто стали такі напрямки:

- концепція побудови Інтернету речей;
- концепція тактильності Інтернет (ТІ).

Як зазначалося вище, поняття IoT має на увазі збільшення доступності інформації в широкому сенсі. Вибір даного напрямку в якості пріоритету - наслідок бажання людини отримати будь-яку необхідну йому інформацію і вміння управляти все більше і більше кількістю процесів.

Реалізація концепції IoT полягає в розробці засобів доступу до інформація, яка в більшості випадків є чутливі датчики – датчики, і розробка способів доставки інформації від ці датчики належать споживачам і системам обробки. Основні підходи Реалізація концепції IoT наведена в документах

МСЕ-Т [193, 194, 139, 140]. Сучасний рівень розвитку ІКС сьогодні дозволяє впроваджувати різні функції та елементи ІоТ.

ІоТ - це місце, де пристрої підключені до Інтернету, якими можна керувати або використовувати для надсилання інформації. Сюди входять пристрої в домашніх господарствах, на підприємствах, заводах, фермах і в містах, доступні в Інтернеті. Ці пристрої можуть включати в себе що завгодно, від «розумних» холодильників, принтерів, веб-камер, лічильників, динаміків, мобільних телефонів, пральних машин, навушників до носимих пристроїв.

Ці пристрої створюють мережу, за допомогою якої ці фізичні об'єкти – «речі» – з'єднуються і можуть «розмовляти», надсилаючи інформацію з датчиків, програмного забезпечення та інших технологій, і обмінюються цими даними з іншими пристроями та системами через Інтернет.

Тому вимоги до мережі ІоТ можуть сильно відрізнятись від вимог до передачі рідкісних коротких повідомлень розміром в кілька байтів до передачі поточкових даних. Структура побудови ІоТ також багато в чому визначається прикладною задачею і може являти собою як структури типу «точка-точка», «зірка», так і деревоподібні структури, як однорівневі, так і багаторівневі. Технології організації каналів зв'язку також можуть бути різними, як дротовими, так і бездротовими.

На сьогоднішній день такі мережі будуються, як правило, з використанням провідних або бездротових технологій зв'язку. З технологій бездротового зв'язку використовуються або технології, що застосовуються в мобільних мережах операторами АТР, або технології побудови бездротових локальних мереж (WLAN), або технології, орієнтовані на побудову бездротових сенсорних мереж (BSS). Часто реалізовані сучасними мережами ІоТ функції називають зв'язком «машина-машина» (M2M). Насправді цей тип зв'язку є одним із компонентів ІоТ (в даний час наймасовіший). Головна відмінна риса ІоТ від інших мереж полягає в тому, що людина не є безпосереднім користувачем мережі. Поведінка пристроїв (речей),

підключених до мережі IoT, не визначається безпосередньо поведінкою людини, що має місце, наприклад, в традиційних мережах зв'язку, де термінал безпосередньо управляється його користувачем. В даний час основним показником розвитку IoT є поширення (проникнення) пристроїв, що реалізують комунікації типу M2M. Кількість таких пристроїв, підключених до ІКС в одному з описаних вище методів, характеризує сучасний стан розвитку IoT. Це число не пов'язане безпосередньо з чисельністю населення, наприклад, як це характерно для терміналів стільникового зв'язку, а визначається потребами в інформації і розвитком областей застосування, де ці мережі використовуються.

Звичайно, області використання IoT також мають певну територіальну прив'язку, яка також продиктована конкретними додатками цих мереж. На цьому рівні розвитку найбільша кількість (щільність) IoT зосереджено в районах з високим рівнем проникнення та інших видах зв'язку, тобто в районах з високою щільністю населення (міста і селища). Ймовірно, з розвитком IoT слід очікувати, по крайній мере, в доступному для огляду майбутньому подібної схеми розвитку. Цілком ймовірно, що щільність IoT-мереж буде вище в тих областях і в тих областях, де присутність людини вище. На рис.1.9 представлена статистика і прогнозовані значення кількості IoT-пристроїв (за оцінкою кількості пристроїв M2M) в світі, отримані на основі даних Cisco [127].

З наведеної гістограми видно, що до 2026 року очікується значне збільшення кількості IoT-пристроїв у світі, приблизно вдвічі від 2022 року. Загальна кількість таких пристроїв наближається до чисельності населення. Слід зазначити, що оцінки, наведені на цьому графіку, можна розглядати як прогноз «знизу», оскільки він заснований лише на аналізі кількості пристроїв M2M, які в даний час домінують в IoT, але з його розвитком вже може приєднатися значна кількість інших видів інтернету речей (ідентифікатори продуктів, віртуальні об'єкти, елементи доповненої реальності, об'єкти побутового та промислового використання). У деяких випадках сучасні

пристрої, що класифікуються як пристрої M2M, класифікуються на ще більш численні групи, в одну з яких входять носимі, тобто мобільні пристрої, тобто ті, які користувач переміщує разом з ним. Існує все ж такі різниця між IoT та M2M. M2M (машина до машини) - стиль комунікацій, що підкреслює передачу даних між великими (іноді промисловими) машинами, який використовує майже миттєву передачу даних для полегшення підвищення ефективності та запобігання проблемам. У випадку IoT мається на увазі, насамперед, активний обмін інформацією між пристроями, раніше не підключеними.

До другої групи пристроїв відносяться пристрої з фіксованим розташуванням, наприклад, пристрої розумного будинку, дорожня інфраструктура і т. д.

Третя група пристроїв - це пристрої, «прив'язані» до транспортних засобів, також мобільні пристрої. Статистика і прогноз, показані на гістограмі, включають в себе пристрої всіх перерахованих груп. Оскільки склад IoT не обмежуються тільки пристроями M2M, в нього також можуть входити інтернет-речі, які сьогодні не мають зв'язку з ІКС. Це, наприклад, різні ідентифікатори товарів і продуктів, домашніх тварин, транспортних засобів, рослин і т.і. Ці інтернет-речі також потрібно враховувати і виявляти, що в майбутньому призведе до того, що вони матимуть зв'язок зі світовим ІКС і поповнять склад IoT. Слід зазначити, що поточні оцінки кількості IoT можуть відрізнятися на порядки, що є наслідком як різних способів класифікації пристроїв і мереж, так і різних методів розрахунку. Однак всі ці оцінки характеризуються однією загальною тенденцією, згідно з якою слід очікувати значного зростання IoT. Вже зараз очевидно, що кількість IoT значно перевищить кількість людей, а мережі IoT стають мережами з високою або надвисокою щільністю пристроїв. Виходячи з основних положень концепції IoT, принаймні всі автоматичні пристрої, які мають доступ до ІКС, можна віднести до інтернет-речей. Крім того, вони також можуть включати в себе інші види об'єктів, включаючи віртуальні речі.

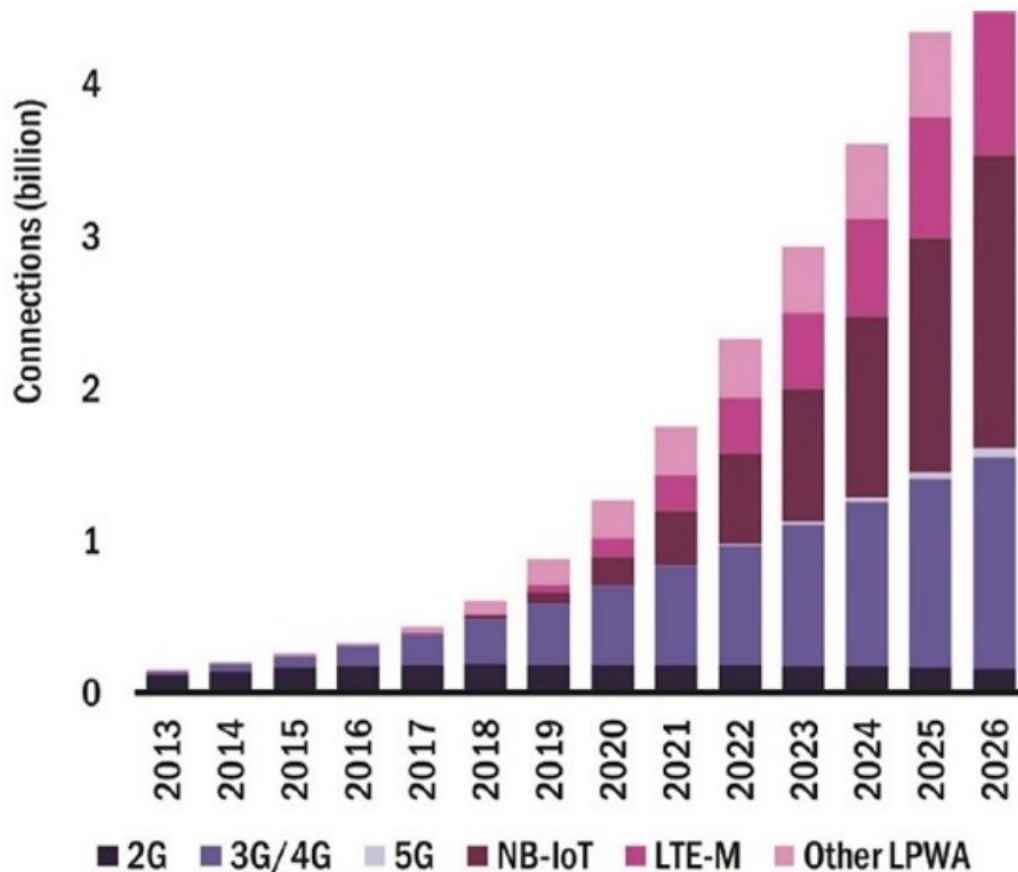


Рисунок 1.9. Зростання кількості IoT-пристроїв у світі
(за даними Cisco)

При оцінці трафіку, звичайно, важлива здатність відповідного класу Інтернету речей виробляти трафік в комунікаційній мережі. В даний час досить складно судити про трафік, який можуть виробляти речі, які не мають певного функціоналу, пов'язаного з прийомом і передачею інформації. Однак сьогодні такий функціонал має досить широкий асортимент інтернет-речей. Це в першу чергу пристрій M2M, під яким можна розуміти будь-який пристрій, здатний відправляти дані по мережі зв'язку і функціонувати без безпосереднього втручання людини. Прогноз зростання трафіку M2M в мобільних мережах і бездротового доступу в світі (Ебіт на місяць), ґрунтуючись на даних [190], наведено на рис.1.10. Згідно з прогнозом, трафік M2M в мобільних мережах до 2022 року виросте в 30 разів в порівнянні з 2012 роком і складе 35 Ебайт на місяць.

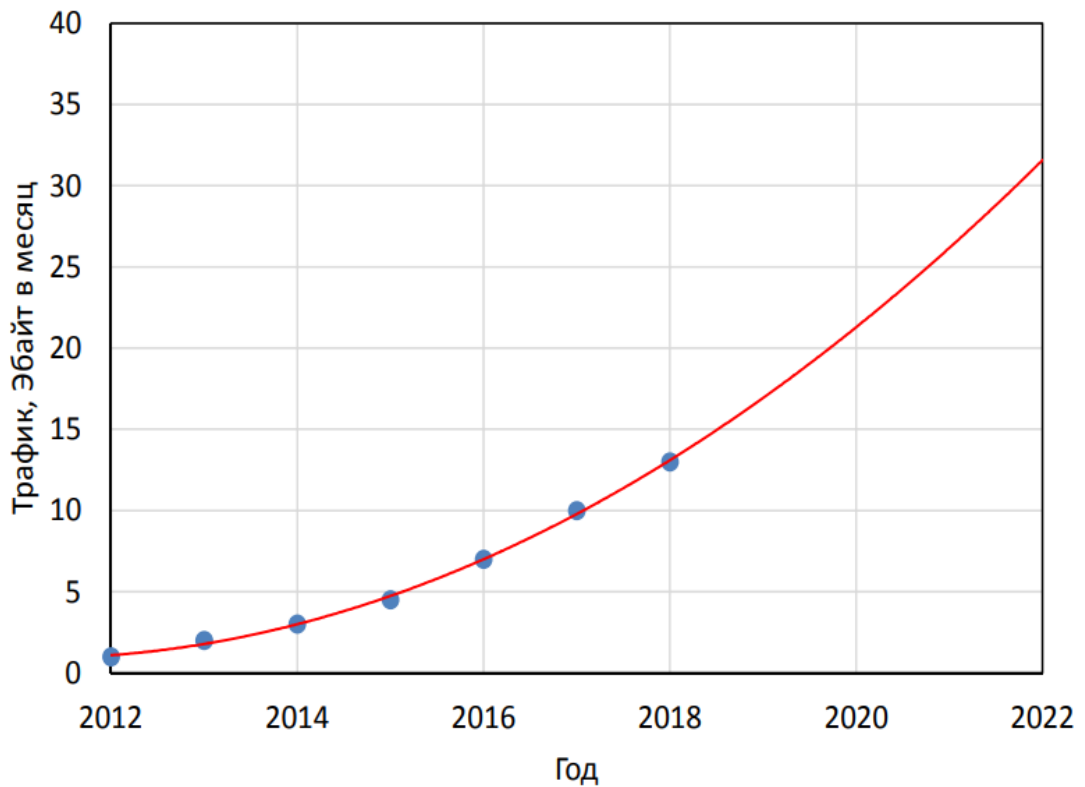


Рисунок 1.10. Прогноз зростання трафіку M2M у мережах мобільного зв'язку та бездротового доступу у світі

Структурний склад трафіку за типами пристроїв буде включати в себе такі основні складові, як:

- трафік, вироблений смартфонами;
- трафік, вироблений ноутбуками;
- трафік, вироблений планшетними ПК;
- Трафік M2M.

Згідно з прогнозом, пристроїв Інтернету речей у 2022 році становитиме понад 30 мільярдів пристроїв, наведених на рис.1.11.



Рисунок 1.11. Прогнозування відносної кількості пристроїв IoT

1.5. Оцінка проблем управління якістю обслуговування Інтернету речей в мобільних мережах п'ятого покоління

Прогнози провідних фахівців, зайнятих у міжнародних проектах 5G, показують, що серед послуг, які надаються в мережах 5G, домінуватимуть послуги передавання відео з високою якістю розподільної здатності, а також IoT [1]. Тому вдосконалення механізмів управління якістю в мережах 5G зосередиться на трафіку відео і M2M-сервісах, удосконаленні алгоритмів контролю та створенні нових методів оцінювання якості.

Досягнення технології LTE і майбутні вимоги до 5G в галузі управління QoS покривають своїми можливостями ланцюжок “кінцевий користувач – кінцевий користувач” (E2E) лише частково, а саме внутрішньомережеві з'єднання “5G – 5G”, “4G – 4G”. На деякі з'єднання, що виникають між абонентами 5G та іншими мобільними і фіксованими мережами, ця система управління якістю не поширюється.

Різниця 4G QoS від 5G QoS в тому, що у 4G LTE QoS застосовується

на рівні пред'явника (виклика) EPS, а у 5G QoS застосовується на рівні потоку QoS (табл.1.1). 4G LTE використовує носії EPS, кожному з яких присвоєно ідентифікатор носія EPS. 5G використовує потоки QoS, кожен з яких ідентифікується ідентифікатором QoS Flow ID (QFI). Як і у випадку з 4G LTE, в 5G підтримуються як потоки, що не стосуються GBR, так і потоки GBR, а також новий GBR, критичний для затримки. До стандарту 5G введена також нова концепція віддзеркаленого індикатора якості (RQI).

Таблиця 1.1

Різниця 4G QoS від 5G QoS

Параметр	5G	4G LTE
Ідентифікатор QoS	5QI	QCI
IP потік: від UE до UPF/P-GW	потік QoS	пред'явник EPS
Ідентифікатор	QFI	EBI
Віддзеркалений QoS	RQI	N/A

Таблиця 1.2

Показники якості стандарту LTE/5G

QFI	Тип джерела	Рівень пріоритету	Затримка пакету, мс	Вирогідність втрати пакету	Приклади сервісів
1	GBR	20	100	10^{-2}	телефонія в режимі реального часу
2		40	150	10^{-3}	відеотелефонія, відео в режимі реального часу
3		30	50	10^{-3}	ігри в реальному часі, сповіщення V2X

4		50	300	10^{-6}	відео з буферизацією
65		75	75	10^{-2}	послуга багатоадресного зв'язку
66		20	100	10^{-2}	послуга не багатоадресного зв'язку
75		25	50	10^{-2}	сповіщення V2X
5	Non-GBR	10	100	10^{-6}	сигналізація (IMS)
6		60	300	10^{-6}	відео з буферизацією, TCP (www, e-mail, chat, ftp, p2p)
7		70	100	10^{-3}	голос, потокове відео, інтерактивні ігри
8		80	300	10^{-6}	відео з буферизацією, TCP (www, e-mail, chat, ftp, p2p)
9		90			спільний доступ, прогресивне відео
69		5	60	10^{-6}	чутливість до затримки
70		55	200	10^{-6}	чутливість до втрати даних
79		65	50	10^{-2}	сповіщення V2X

Потік QoS є найнижчим рівнем деталізації в системі 5G. Один або

кілька потоків службових даних (SDF) можуть транспортуватися в одному потоці QoS, якщо вони мають однакову політику (подібно до носія EPS у 4G LTE). Весь трафік в межах одного потоку QoS отримує однакову обробку. Відповідно до 3GPP TS 23.501 існує кілька стандартизованих значень 5QI (табл.1.2).

Інфраструктура мереж 5G будуватиметься на основі хмарних технологій – як у мережах радіодоступу (Cloud RAN) з програмно-визначеною мережею (SDR), так і в базовій мережі (Cloud CN) з програмно-визначеною інфраструктурою (SDN). Повна віртуалізація мережевих функцій (NFV), яка буде реалізована в інфраструктурі 5G, охопить контроль і управління QoS, політику обслуговування та пріоритезації трафіку. У процесі еволюції механізму управління якістю послуг у мережах 3GPP відбулася міграція від управління QoS на рівні абонентських терміналів до управління QoS на рівні мережі. Цей підхід збережеться і в мережах 5G. Механізми управління QoS у мережах 5G повинні забезпечувати пріоритезацію трафіку Video over 5G і VoIP щодо трафіку веб-пошуку й іншими прикладними програмами, толерантними до часових параметрів потоку даних [3]. Послуга потокового відео без буферизації дуже чутлива до затримок у мережі, тому одним з найважливіших параметрів, що визначають вимоги до QoS, є сумарна затримка передавання пакетів (Packet Delay Budget, PDB), яка утворюється на радіоінтерфейсі RAN і трактується як максимальна затримка передавання пакетів з рівнем достовірності 98 %. У табл.1.3 наведено вимоги до затримок у мережах 3G/4G/5G, сформовані в 3GPP і проекті METIS [4]. З табл.1.2 випливає, що з переходом від покоління до покоління в мережі мобільного зв'язку підвищуються вимоги до нижньої межі загальної затримки даних. Також аналіз вимог до загальної затримки в мережі 5G показав, що, з огляду на ефект накопичення, затримка в мережі RAN 5G повинна бути меншою за 1 мс.

Таблиця 1.3

Вимоги для загальної затримки в мережах 3G/4G/5G

Умови для QoS	PDB, мс		
	3G	4G	5G
Без гарантій якості	Не визначено	100 – 300	Не визначено
З гарантованою якістю	100 – 280	50 – 300	1

Ще одним критерієм якості є частка втрачених пакетів через помилки під час приймання пакетів даних. Значення цього параметра, що визначає найбільшу кількість втрачених IP-пакетів для відеотрансляцій у разі їх передавання по мережі мобільного зв'язку 3G/4G/5G, наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Частка втрачених пакетів для відеотрансляцій

Умови для QoS	SDTV	HDTV	4K UHD	8KUHD
Покоління мобільного зв'язку	3G/4G	4G	4G	5G
Відеотрансляція з гарантованою якістю	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}

У мережах 5G зміниться мережева архітектура модулів, що відповідають за якість послуг у мережі 5G. Розвиток концепції віртуалізації – втратити зв'язок із мережею NFV – призведе до віртуалізації функцій управління якістю, які можна подати у вигляді двох основних функцій:

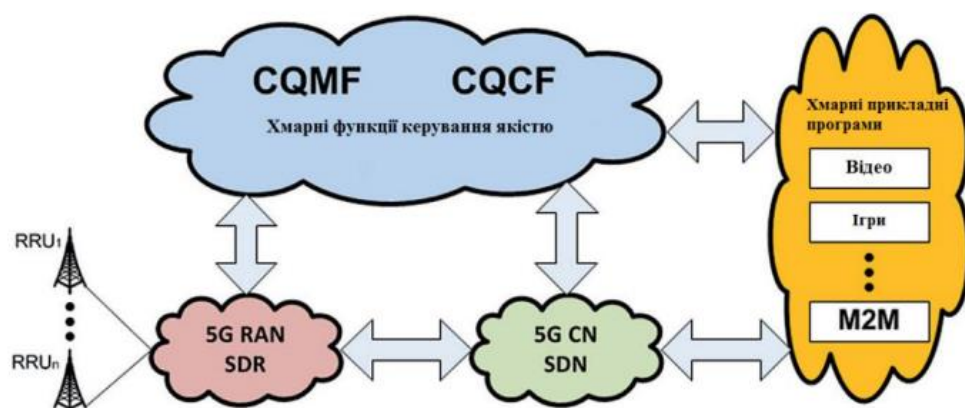


Рисунок 1.12. Віртуалізація функцій контролю і керування у мережі 5G контролю QoS (Cloud QoS Control Function, CQCF) і управління QoS (Cloud QoS Management Function, CQMF) (рис. 1.12).

Таблиця 1.5

Проблеми IoT та засоби їх розв'язання

Проблеми IoT	Вирішення
Енергоефективність	MIMO
Масштабованість	Ретранслятори
Інтелектуальна обробка та збереження	MmWave, D2D
Безпека	HetNet, D2D, MIMO, SDN
Функціональна сумісність	D2D

Функція CQCF контролю QoS забезпечуватиме в мережі 5G контроль у реальному часі потоків трафіку на основі встановлюваних під час з'єднання рівнів QoS. Основні механізми контролю QoS – профілювання трафіку, планування і управління потоками даних.

Функція CQMF управління QoS забезпечуватиме в мережі 5G підтримку QoS згідно з договорами обслуговування SLA, здійснення моніторингу, обслуговування, перегляд і масштабування QoS [3].

Розглянуті проблеми IoT та запропоновані засоби їх розв'язання зведено в табл.1.5.

Вирішення проблеми енергоефективності можливе, якщо обладнання підключається за допомогою датчиків лише при необхідності застосування, без з'єднання з базовою станцією, що знижує споживання енергії.

1.6. Постановка задачі досліджень

Аналіз методологічних підходів до адаптації IoT до 5G свідчить про наявність протиріч, які властиві процесу проектування таких систем. З одного боку, кожен елемент IoT має свої конструктивні особливості, які пов'язані з його функціональним призначенням. З іншого боку, ці конструктивні особливості повинні відповідати можливостям мережі 5G.

Тобто особливості функціонування систем IoT, що розроблюються, можуть бути класифіковані і враховані при розгляді загальної схеми їх побудови на загальних принципах функціонування мережі 5G.

Оскільки метою дисертаційної роботи є адаптація IoT до мережі 5G, в дисертаційній роботі ставиться і вирішується наукова проблема – розробити теоретичні і методологічні основи побудови високоефективних систем IoT в умовах обмежених ресурсів мережі 5G.

Об'єкт дослідження – процес передачі даних IoT в мережі 5G шляхом розроблення моделей, методів адаптивного управління мережевими ресурсами та якістю надання сервісів.

Предмет дослідження – моделі, методи та алгоритми оптимізації показників якості обслуговування мережі IoT в мережі 5G.

Задачі, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети:

1. аналіз існуючих методів управління якістю обслуговування Інтернету речей в мобільних мережах п'ятого покоління;
2. розробка концептуальної моделі мережі стандарту LTE/5G з наданням сервісів Інтернету речей;
3. розробка концептуальної моделі мережі Інтернету речей з адаптивним управлінням якістю;
4. розробка математичної моделі забезпечення якості обслуговування в мережі Інтернету речей;
5. розробка імітаційної моделі мережі стандарту LTE/5G з наданням сервісів Інтернету речей;
6. розробка алгоритму білінгової системи мережі стандарту LTE/5G з наданням сервісів Інтернету речей;
7. розробка методології забезпечення якості обслуговування Інтернету речей в мережі стандарту 5G.

Необхідність вирішення першої задачі диктується потребою обмежити клас систем для дослідження.

Метою вирішення другої й третьої задач є узагальнення теорії

функціонування IoT у мережі 5G.

Метою вирішення четвертої й п'ятої задач є моделювання забезпечення якості обслуговування в мережі Інтернету речей з метою оцінки функціонування IoT у мережі 5G.

Необхідність вирішення шостої задачі впливає з оцінки можливості таканометрії використання IoT у мережі 5G.

Необхідність вирішення сьомої задачі диктується потребою узагальнення методів адаптивного керування розподілом ресурсів мережі стандарту LTE/5G з наданням сервісів Інтернету речей.

Рішення вказаних взаємопов'язаних задач визначило структуру й зміст дисертаційної роботи (рис.1.13).

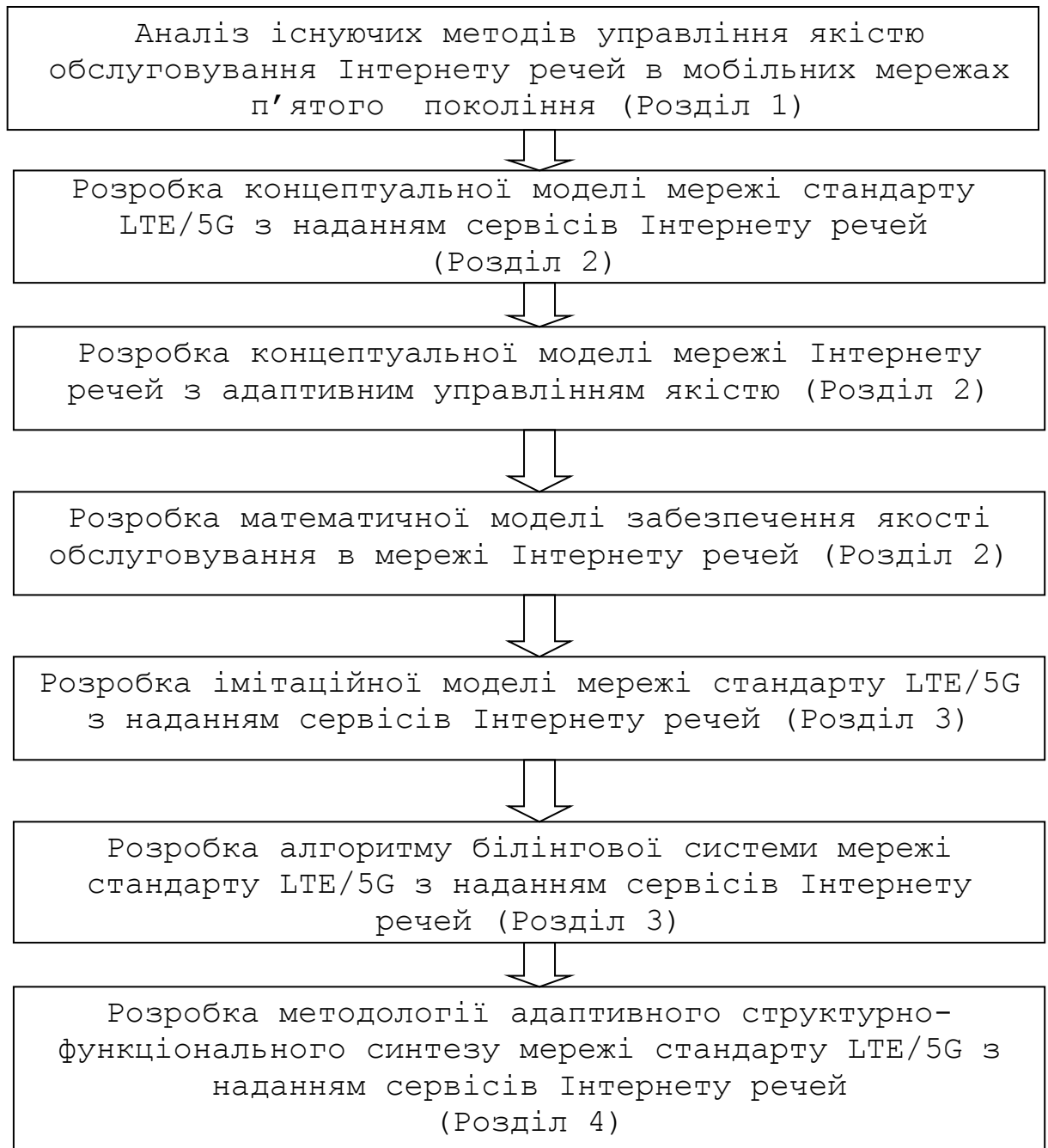


Рисунок 1.13. Завдання дослідження даної дисертаційної роботи і послідовність їх виконання

1.7. Висновки за розділом 1

1. IoT - це концепція найближчого майбутнього, яка формує наше життя. 5G - це одна з передових технологій для систем стільникового зв'язку. Зміни, які несуть бездротові мережі 5G, – це перспективне спрямування у

порівнянні з наявними стільниковими мережами. 5G технології задовольняють основним вимогам і забезпечують зв'язок IoT за такими параметрами як тривале покриття, висока швидкість передачі даних, масштабованість і емісія. У цьому огляді після аналізу систем IoT можна зробити висновки, що проблеми IoT частково вирішуються завдяки технологіям, таким як HetNet, D2D, MIMO, SDN, mmWave. Таким чином, перспективні стільникові мережі 5G можна розглядати як ключовий фактор підтримки технології IoT.

На теперішній час не існує єдиного методологічного підходу до проектування мереж IoT.

2. Стандартизація технічних вимог щодо якості послуг у мережах зв'язку здійснюється на глобальному рівні Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU), на міжнародному регіональному рівні — Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI), Асоціацією телекомунікаційної промисловості (TIA), Американським національним інститутом стандартів (ANSI) та ін.

3. Дослідження забезпечення якості обслуговування IoT в мережі 5G доцільно починати зі створення концептуальних моделей самої мобільної мережі та моделі мережі IoT.

4. Перевагу в дослідженні функціонування IoT мають імітаційні моделі, оскільки вгадувати зміну різноманітних впливів на роботу систем IoT заздалегіть не можливо. Цей метод потрібно застосовувати для оцінки варіантів структури, ефективності алгоритмів керування, впливу зміни різноманітних параметрів функціонування IoT. Імітаційне моделювання повинне бути положено в основу структурного, алгоритмічного і параметричного синтезу таких систем, якщо потрібно створити систему IoT з заданими характеристиками при визначених обмеженнях.

5. Для створення імітаційної моделі мережі IoT необхідна розробка її математичної моделі.

6. При проектуванні систем IoT потрібно застосовувати блочну

побудову. При виконанні цього принципу полегшується розроблення складних систем і з'являється можливість використання накопиченого досвіду і готових блоків з мінімальними зв'язками між ними. Розподіл блоків робиться з врахуванням розподілу розробки по етапах і режимах функціонування системи.

7. Методологія забезпечення якості обслуговування IoT в мережі стандарту 5G повинна складати систему методів щодо адаптивного розподілу мережевих ресурсів між пристроями IoT.

Основні наукові та практичні результати розділу опубліковані в роботах [1,16,34,47,58,60,63,64,82,94,102,132,149,161,162,189,191].

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ З АДАПТИВНИМ УПРАВЛІННЯМ ЯКІСТЮ

Гарантування якості обслуговування з кінця в кінець є складним завданням для операторів мобільного зв'язку, оскільки вихід пакетних даних за межі рівня 5G ядра мережі (5GC) у рівень зовнішніх IP-орієнтованих мереж, наприклад, у рівень WLAN, не забезпечує жодних гарантій щодо якості обслуговування цієї мережі. Це пов'язано з тим, що політика управління інформаційними потоками в вузлах мережі IoT базується на окремих методах забезпечення QoS, до яких оператор мобільного зв'язку немає жодного впливу.

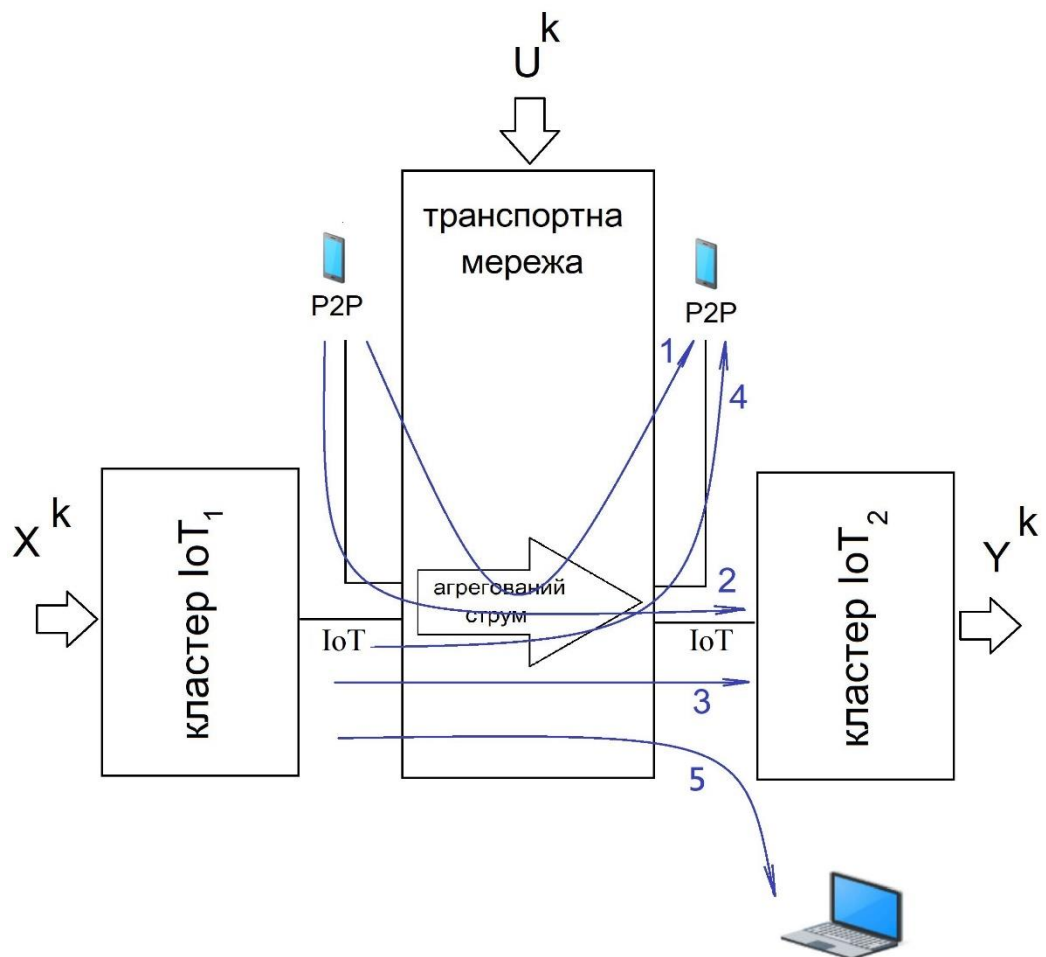


Рисунок 2.1. Концептуальна модель взаємодії мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей

Під концептуальною моделлю будь-якої ІКС слід розуміти її абстрактну модель, яка визначає структуру та властивості її елементів, а

також враховує вхідні, вихідні параметри, зовнішні фактори та керуючий вплив. Така модель в самому загальному вигляді визначається залежністю:

$$Y^k = f(X^k(t), W^k(t), U^k(t), O^k(t)), \quad (2.1)$$

де Y^k - вихідні параметри системи, яка складається з k класів елементів;

X^k - вхідні параметри;

W^k - параметри внутрішнього стану;

U^k - параметри керованого впливу;

O^k - параметри зовнішніх факторів.

Всі параметри можуть змінитися за часом t .

Концептуальна модель взаємодії мережі стандарту 5G з мережею IoT складається з вхідного і вихідного кластерів IoT та транспортної мережі (рис.2.1). В якості транспортної мережі виступає мережа стандарту 5G, яка обробляє звичний для неї потік P2P («peer-to-peer», «person-to-person», від людини до людини, від рівного до рівного), а також і потік пристроїв IoT. Ця модель повинна врахувати особливості такої системи:

- розподілена архітектура побудови підсистеми;
- багатокомпонентний трафік з самоподібною структурою;
- обмеження використовуваних мережевих ресурсів,
- необхідність забезпечення стійкості зв'язку за умовою, що у пристроїв IoT може бути автономне електроживлення.

Позначені за (2.1) параметри мають наступне визначення:

а) для вектору X^k :

- мережі Bluetooth;
- безпроводні локальні мережі WLAN;
- глобальна мережа з низьким енергоспоживанням LPWAN з трьома найбільш важливими технологіями LoRaWAN, SigFox, Narrowband-IoT.

б) для вектору Y^k :

- параметри якості обслуговування в мережі стандарту 5G (див. табл.2.2);

в) для вектору U^k :

- політика обслуговування пакетів в мережі стандарту 5G, яка забезпечує з належною якістю обслуговування проходження потоків 1-4, де потік 1 – спілкування та передача даних між людьми (модель взаємодії «User-User»), 2 – керування людиною пристроями IoT за допомогою мобільних додатків (модель взаємодії «User-Thing»), 3 – передача даних між пристроями IoT без участі людини (модель взаємодії «Thing-Thing»), 4 – моніторинг людиною параметрів будь-яких систем IoT через мобільні додатки (модель взаємодії «Thing-User»), 5 – моніторинг людиною параметрів будь-яких систем IoT через інтернет (модель взаємодії «Thing-Web Object») або у зворотному напрямку. Вірогідний процес передачі пакетів даних описується середнім часом його доставки та вірогідністю своєчасної його доставки, а також інформаційною швидкістю реального часу мережі. Ці підключення зазвичай здійснюються за допомогою бездротових технологій. Різноманітність IoT створює різноманітний за інтенсивністю, чутливістю до затримки й втрат трафік. Користувачів IoT можливо поділити на три групи: домашні користувачі, офісні користувачі та центри обробки даних. З інформаційною точки зору IoT надають у вигляді символічної формули: IoT=датчики+дані+мережі+послуги;

- рівень пріоритету за замовчуванням (Default Priority Level), бюджет затримки пакета (Packet Delay Budget), вірогідність помилки пакету (Packet Error), максимальний розмір пакету даних за замовчуванням (Default Maximum Data Burst Volume), розмір вікна усереднення за замовчуванням (Default Averaging Window);

- принципи взаємодії пристроїв IoT між собою. IoT пристрої спроможні взаємодіяти між собою за безпроводною технологією. Звично IoT реалізуються з автономним електроживленням та мають обмежений енергоресурс. При недостатньому рівні напруги електроживлення пристрій IoT переходить зі стану «справний» до стану «несправний», а при повною відсутності електроживлення пристрої IoT переходить до стану «непрацездатний». Ця особливість безпроводних IoT врахована в їх вірогідно-

енергетичних характеристиках. Врахування цих характеристик значно ускладнює модель взаємодії пристроїв IoT в мережі стандарту 5G, тому в цей роботі в подальшому не розглядається;

- категорії пристроїв IoT. Основними категоріями пристроїв IoT для обох кластерів є смарт-пристрої, датчики, виконавчі пристрої та мікроконтролери.
- параметри зовнішніх факторів O^k (інтерференція, багатопроменеве відбиття сигналів, згасання сигналу та інші) в роботі також не розглядаються.

Якість в такій системі можливо забезпечити як адаптивним управлінням шляхом зміни політики обробки інформації, так і зміною структури G самій системи. Результатом адаптації будуть найкращі (оптимальні у ці їх умовах) показники якості обслуговування. При цьому адаптацію (U^k) слід здійснювати на основі застосування принципів декомпозиції (окрема мережа IoT, окрема транспортна мережа), потім - системності (оцінювання якості обслуговування з кінця в кінець) та ітерації. Параметри внутрішнього стану (надійність самого обладнання мережі, автономність його енергоживлення та ін.) в роботі не розглядаються. В цілому запропонована методологія дозволяє перейти від розв'язання багатокритеріальної задачі оптимізації великої розмірності до послідовності задач меншої розмірності, пов'язаних між собою вхідними X^k і вихідними даними Y^k . В результаті в ході вирішення реалізується поетапний ітераційний вибір значень внутрішніх параметрів W^k (параметричний синтез), при яких виконуються вимоги до якості обслуговування в мережі.

Функціонал

$$\Phi(G, Y) \xrightarrow[G \in \Omega_G, Y \in \Omega_Y]{extr} G_{opt}, Y_{opt} \quad (2.2)$$

є узагальненим критерієм (цільовою функцією) адаптації, де Ω_Y - кінцева множина допустимих параметрів якості обслуговування IoT в мережі 5G (швидкісні показники, часові показники, показники надійності); Ω_G - кінцева множина допустимих структур мережі IoT в мережі 5G; Y_{opt}, G_{opt} - оптимальні параметри якості обслуговування та структури мережі IoT в мережі 5G.

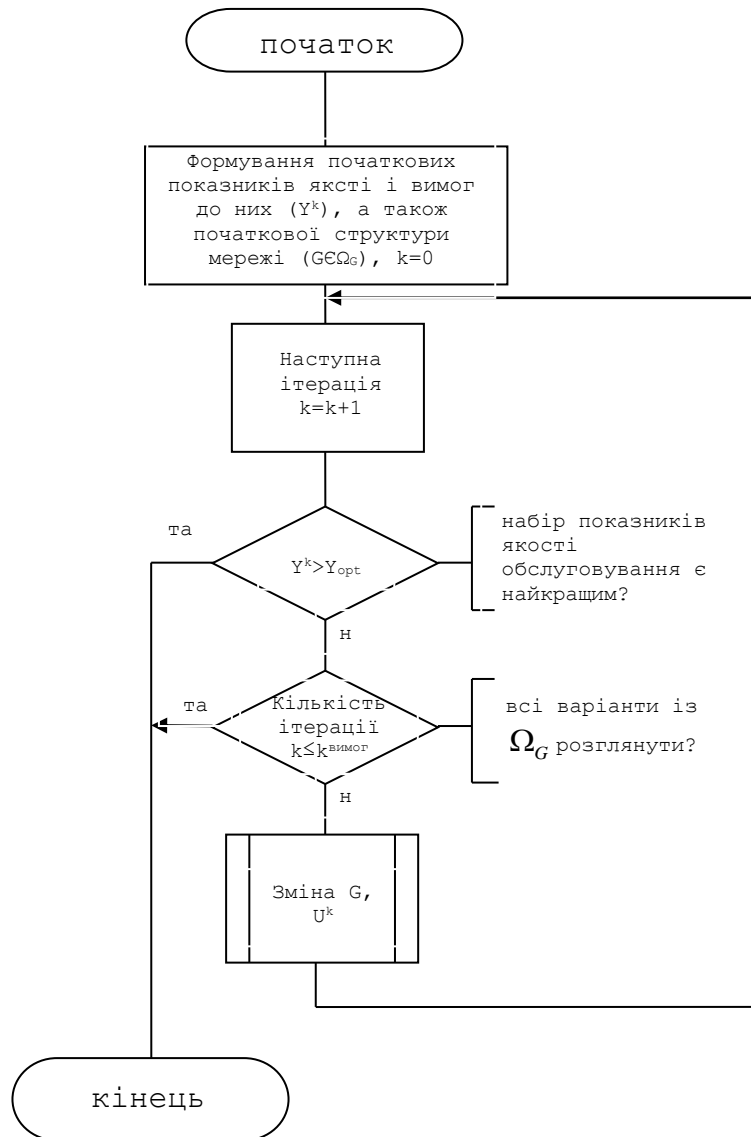


Рисунок 2.2. Алгоритм адаптації параметрів мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей

В цілому застосування розробленого алгоритму адаптації передбачає розрахунок скінченної множини альтернативних варіантів побудови мережі G і вибір особою, яка приймає рішення, найкращей альтернативи за критерієм якості обслуговування в мережі. Кількість альтернативних варіантів визначається кількістю ітерацій.

В загальному випадку процес адаптації пояснюється наступним алгоритмом (рис.2.2) та передбачає:

- формування вихідних даних (за призначенням, складом пристроїв IoT,

видами послуг, що надаються тощо), системами показників якості на основі запровадження класів якості послуг (пріоритетів) та вимог до них;

- моделювання процесів роботи мережі IoT в мережі 5G, у тому числі формування початкової структури мережі зв'язку мінімальної довжини заданої зв'язності з урахуванням вимог до призначення, включаючи установку матриці суміжності N , інциденту Z , маршрутів P , вирішення завдань статичної маршрутизації (вибір оптимальних маршрутів) і розподілу потоків (за пріоритетами); налаштування набору моделей приєднання IoT до мережі 5G, що забезпечує дослідження процесів їх функціонування при найпростіших, довільних і самоподібних потоках, комутацію пакетів фіксованої і змінної (довільної) довжини, обмеженої черги, якість управління послугами на основі відносних пріоритетів; вирішення завдання пріоритизації за категоріями IoT, налаштування моделі мережі на основі її декомпозиції на самостійні елементи;

- вибір поточкових моделей і прикладних моделей комутаційних вузлів, а також установка початкових значень параметрів, у т.ч. вибір поточкових моделей (найпростіших або само подібних), що здійснюється в залежності від видів послуг або на основі вимірювань в мережі;

- аналіз ефективності процесів роботи мережі IoT в мережі 5G, включаючи розрахунок швидкісних показників, часових показників та показників надійності;

- параметричний синтез мережі IoT в мережі 5G при забезпеченні вимог якості обслуговування.

Щоб побудувати алгоритм адаптивного управління мережею IoT в мережі 5G потрібно здійснити наступні кроки:

- розробка концептуальної моделі мережі стандарту 5G з наданням сервісів Інтернету речей з метою визначення вектору параметрів її стану та місця IoT в цьому векторі;

- розробка концептуальної моделі взаємодії мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей з метою визначення способів та прийомів

підключення IoT до мережі 5G, а також можливих інструментів для управління якістю;

- визначитися з топологією мережі системи масового обслуговування в складі мережі IoT та мережі 5G та її матрицею передач мережі;
- визначити математичну модель цієї мережі та систему її показників якості окремо для кластерів IoT, окремо для мережі 5G та системи масового обслуговування в цілому.

Більш детально процес структурної адаптації з боку IoT буде розглянутий у розділі 3, а з боку мережі 5G з застосуванням політики пріоритетів – у розділі 4.

2.1. Розробка концептуальної моделі мережі стандарту 5G з наданням сервісів Інтернету речей

Будь-яка ІКС в загальному вигляді є розподіленою в просторі технічною системою з програмно-технічними засобами обробки та обміну інформації (підсистемами). Мережа мобільного зв'язку (ММЗ) не є виключною. Наприклад, для ММЗ стандарту 5G на вході такій системи знаходяться користувачеві пристрої UE (User Equipment), внутрішній стан описується ядром мережі, керований вплив забезпечується в вузлах gNB, керувати необхідне і потоками, і ресурсами, зовнішніми факторами звично є інтерференція, багатопроменеве відбиття сигналів, затухання сигналу та інші, вихідними параметрами системи будуть значна кількість показників якості обслуговування.

Відповідно до (2.1) вектор вхідних параметрів X^k може бути заданий набором агрегатів, наприклад:

$$X^k = [Q^{k,q}, y_{ij}^m], \quad (2.3)$$

де $Q^{k,q}$ - кількість термінальних систем k -го класу трафіку q -го типу;

y_{ij}^m - інтенсивність викликів між вузлами i та j мережі.

В мережі стандарту 5G $q=2$ та визначено два типу виділеного ресурсу: з гарантованою швидкістю передачі даних (GBR) або з негарантованою швидкістю передачі (Non-GBR), де 4 класу за типом 1 (1..4) та 5 класів за типом 2 (5..9) [203] та де k відповідає ідентифікатору якості QFI.

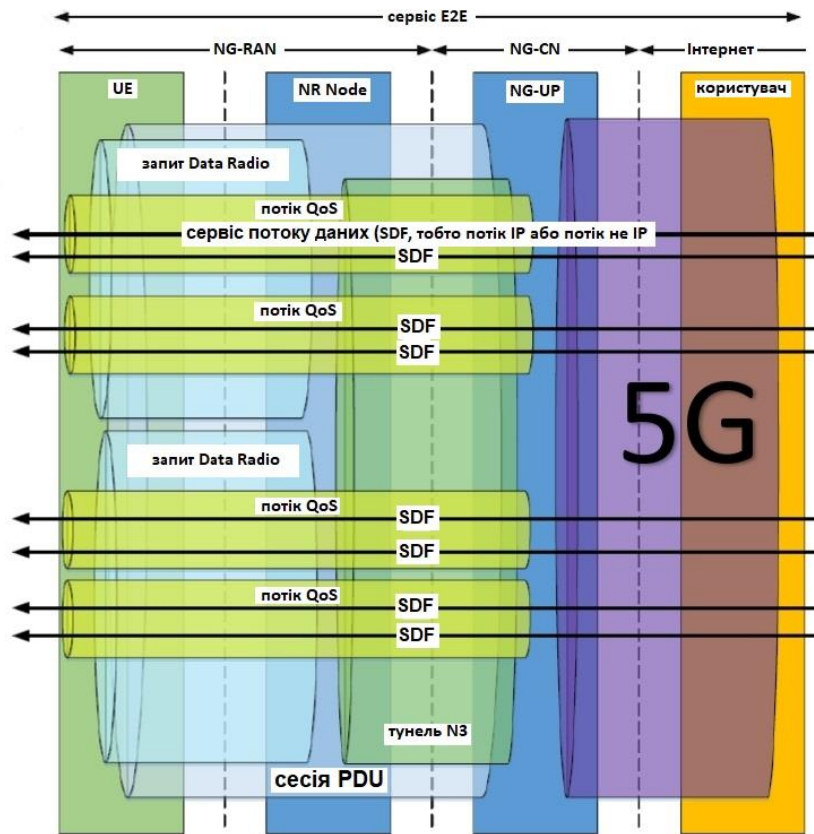


Рисунок 2.3. Логічна модель MM3 стандарту 5G

Логічна модель MM3 стандарту 5G надана на рис.2.3, де:

- NG-RAN - мережа радіо доступу, відповідає за забезпечення радіодоступу до мереж 5G;
- 5GC - ядро мобільної мережі 5G, яке встановлює надійне, безпечне підключення до мережі для кінцевих користувачів і надає доступ до її послуг. Основний домен обробляє широкий спектр важливих функцій у мобільній мережі, таких як управління підключенням та мобільністю,

- аутентифікація та авторизація, управління даними абонентів та управління політикою, серед іншого;
- UE – абонентський пристрій (пристрій IoT);
 - gNB - базова станція стандарту 5G, яка використовує технологію нового радіо (NR) і називається gNodeB (gNb);
 - UPF - функція площини користувача 5G, яка дозволяє децентралізувати компонент пересилання даних (PGW-U) та виконувати обробку пакетів та агрегацію трафіку ближче до краю мережі, підвищуючи ефективність пропускної здатності, одночасно зменшуючи мережу;
 - PDN - мережа пакетної передачі, яка надає доступ до пакетних мереж передачі даних і відповідає за формування параметрів QoS і пропускної здатності, виступає в ролі IP-маршрутизатора для специфічних для мобільних пристроїв протоколів тунелювання і сигналізації;
 - NG-U - інтерфейс плану користувача, якій підтримує обмін сигнальною інформацією між NG-RAN і 5GC та визначає взаємозв'язок вузлів NG-RAN з AMF, що поставляються різними виробниками;
 - N6 - набір нестандартизованих функцій користувальницької площини, розгорнутих у сучасних мережах (також званих функціями GI/N6 LAN) для служби мобільного широкосмугового зв'язку.

Вектор параметрів внутрішнього стану W^k може бути заданий набором агрегатів, наприклад:

$$W^k = [G, Z, H_h^k, V_{ij}, p_{ij}], \quad (2.4)$$

де G - тип структури мережі зв'язку (UE, gNB, UPF, PDN),

Z - властивості системи зв'язку (5QI, RQI);

H_h^k - типи протоколів зв'язку (Radio, NG-U, N6);

V_{ij} - швидкість передачі, затримки пакету;

p_{ij} - вірогідність похибки передачі, вірогідність втрати пакету.

Структура мережі зв'язку G описується агрегатом

$$G = [G^*, U_s], \quad (2.5)$$

де G^* - множина структур функціональних підсистем (NG-RAN, 5GC);
 U_s - множина зв'язків між функціональними підсистемами (E2E Service, PUD Session/Session ID, Radio Bearer, UP Tunnel, QFI, Service IP).

Можливо виділити сім типів структур G^* :

$$G^* = [G_d, G_f, G_a, G_m, G_v, G_p, G_g], \quad (2.6)$$

де G_d - структура дій;
 G_f - структура функцій;
 G_a - структура абстрактна;
 G_m - структура морфологічна;
 G_v - структура варіантна;
 G_p - структура просторова;
 G_g - структура геометрична.

Властивості системи зв'язку Z визначаються властивостями її структурних складових Z^i , які можуть значно відрізнятися від властивостей системи зв'язку в цілому.

Параметрами керованого впливу можуть бути показники керованості та спостережуваності (моніторингу). Параметри керованого впливу відображають тип системи адміністрування системи зв'язку, у т.ч. системи керування безпекою:

$$U^k = [A^k, S^k_h(M_h)], \quad (2.7)$$

де A^k характеризує систему керування мережею;
 $S^k_h(M_h)$ - базові S - послуги безпеки, які реалізуються M - механізмами захисту на h - рівні логічної структури [12].

Параметри зовнішніх факторів O^k - це фізичний або технологічний процес внутрішнього або зовнішнього характеру, який може порушити функціонування елементів мережі: інформаційний вплив на обладнання мережевих вузлів, електромагнітний вплив на радіоканал та ін. Дуже часто в сучасних мережах мобільного зв'язку, зокрема у радіосегменті виникає ситуація, при якій виникають короткочасні відмови каналу за рахунок

тимчасового погіршення відношення сигнал/шум різними зовнішніми факторами, інтерференція, багатопроменеве відбиття сигналів, затухання сигналу та інші, що значно впливає на якість обслуговування.

Вихідними параметрами Y^k концептуальної моделі мереж мобільного зв'язку 5G можуть бути параметри якості обслуговування QFI.

Таким чином, концептуальна модель мережі мобільного зв'язку в загальному випадку буде зайве громіздка, тому таку модель краще будувати для дослідження конкретної проблеми з обмеженим переліком параметрів. Так, наприклад, модель мережі мобільного зв'язку стандарту 5G може бути такою (рис.2.4).

Позначені за рис.2.4 параметри мають наступне визначення:

а) для вектору X^k :

- пристрої M2M. Зв'язок M2M вимагає автономного зв'язку між великою кількістю розумних пристроїв, таких як датчики та виконавчі механізми, які одночасно надсилають невеликі пакети даних, використовуючи широкий спектр програм. Цей зв'язок відрізняється від мобільного зв'язку між людьми і вимагає інфраструктури, різної з точки зору розміру пакетів, щільності трафіку та якості обслуговування. Ключовими вимогами зв'язку M2M є низька затримка, наднизьке енергоспоживання, масштабованість для обробки надзвичайно великої кількості пристроїв, довгострокова надійність, висока швидкість і пропускна здатність для певних додатків, таких як доповнена реальність і автономні автомобілі, малий розмір даних для певних додатків;

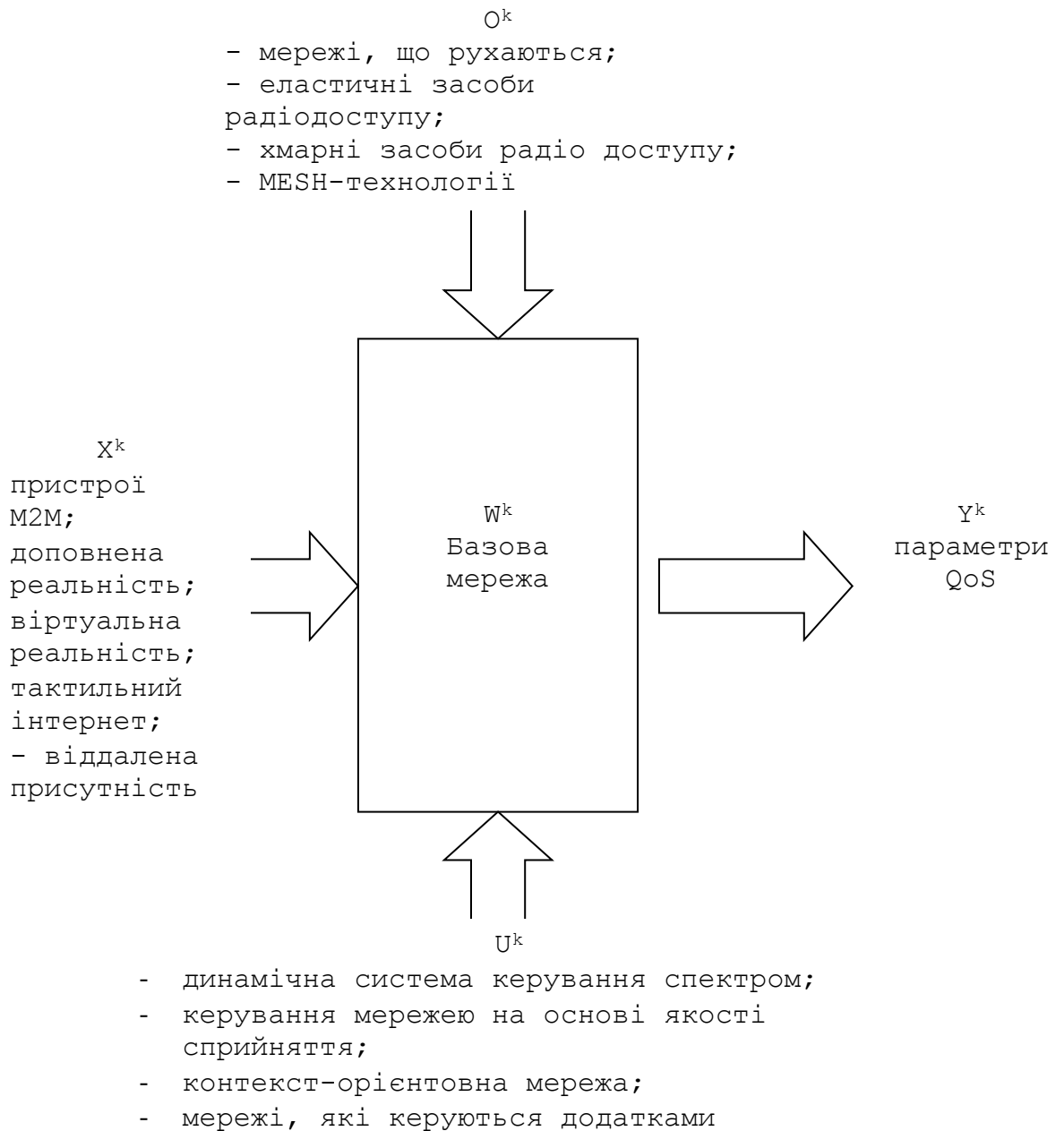


Рисунок 2.4. Концептуальна модель мережі мобільного зв'язку стандарту 5G

- доповнена реальність (AR). Щоб розширити реальність додатковою інформацією, необхідно мати, наприклад, смартфон або спеціальні окуляри і відповідні додатки. Додаткам буде потрібен доступ до камери телефону, щоб розпізнавати предмети оточуючого середовища, а також до акселерометру, гірокомпасу та ін. За допомогою доповненої реальності можливо не тільки отримувати корисну інформацію про реальний світ, але і розважатися.

- віртуальна реальність (VR). Вхід у віртуальну реальність можливий за допомогою спеціальних VR-окулярів, таких як Oculus Rift або HTC Viva. Ці окуляри закривають очі повністю, реальна дійсність візуально вже не сприймається і залишається за межами віртуального світу. Датчики в окулярах відстежують рухи користувача, віртуальна реальність в режимі реального часу підлаштовується під ці рухи, створюючи так звану віртуальну реальність;

- тактильний інтернет (TI). Тактильний Інтернет є наступною сходинкою розвитку Інтернету речей, що передбачає передачу не тільки звукових і відео даних, а й еквівалент людських дотиків. Характеристики мережі: затримки менше 1 мс; для виконання критичних дій (керування БПЛА, віддалена медична операція) неприпустимі втрати в мережі, відмова обладнання і т. д., швидкість передачі даних більше 10 Гбіт/с; щільність мережі – більше 100 пристроїв на 1 м²;

- віддалена присутність - рішення віртуальної присутності, яке дозволяє експерту асистувати спеціалісту на відстані. Віддалена присутність забезпечується за допомогою цифрового пристрою типу планшета, окулярів доповненої реальності, комп'ютера з головним гарнітуром або інших цифрових пристроїв.

б) для вектору Y^k :

- рівень пріоритету за замовчуванням (Default Priority Level), бюджет затримки пакета (Packet Delay Budget), помилка пакета (Packet Error), максимальний пакет даних за замовчуванням (Default Maximum Data Burst Volume), вікно усереднення за замовчуванням (Default Averaging Window);

в) для вектору U^k :

- динамічна система керування спектром;
- керування мережею на основі якості сприйняття;
- контекст-орієнтовна мережа;
- мережі, які керуються додатками

г) для вектору O^k :

- мережі, що рухаються;
- еластичні засоби радіодоступу;
- хмарні засоби радіодоступу;
- MESH-технології. Mesh – це засіб радіодоступу для усунення зон зі слабким сигналом і забезпечення безперервного покриття;

д) для вектору W^k :

- кількість секторів антени базовій станції. Антена базової станції розділена на кілька секторів, кожен з яких спрямований у свій бік. Кожен сектор може обслуговувати до 72 дзвінків одночасно в залежності від налаштування та конфігурації. Усього може бути 6 секторів («граней стільника»), таким чином, одна базова станція може обслуговувати до 432 дзвінків;
- кількість базових станцій. Стільникова мережа може складатися з базових станцій різного стандарту, що дозволяє оптимізувати роботу мережі й поліпшити її покриття;
- кількість контролерів базових станцій. У залежності від обладнання один контролер (BSC) може обслуговувати до 60 базових станцій;
- кількість комутаторів. Кожен комутатор (MSC) обслуговує від 2 до 30 контролерів та ін.

Серед цієї великої кількості параметрів можна виділити умовно статичні і динамічні, де під статичними параметрами будуть розумітися параметри, які вже склалися при початковій побудові мережі і не можуть змінюватися адаптивно до існуючих потреб, наприклад, кількість базових станцій, а динамічні параметри будуть розумітися як такі, які можна легко змінювати програмно, наприклад, реалізація функції віртуалізації або зміна пріоритету обслуговування трафіку. Саме програмна зміна параметрів мережі може стати інструментом адаптивного управління сервісом IoT в мережі 5G.

2.2. Математична модель взаємодії мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей

У табл. 2.1 представлено методи збору та обробки інформації від IoT

Таблиця 2.1

Основні характеристики методів збору та обробки інформації від IoT

Метод	Протоколи та технології	Апаратні засоби	Інфраструктура
Прямий зв'язок	NB-IoT	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

Існує два методи збору інформації за допомогою пристроїв IoT: прямий, який організується безпосереднім з'єднанням пристрою IoT та ММЗ, та через проміжну точку збору (інтелектуальний концентратор або точка доступу).

Прикладом взаємодії у вигляді прямого зв'язку є функціонування NB-IoT в мережі стандарту 5G. NB-IoT дозволяє отримати доступ до мережевих послуг через E-UTRA з пропускнуою здатністю каналу, обмеженою 200 кГц. NB-IoT, це термін, визначений 3GPP у випуску 13 (NB-IoT категорія NB1), а потім покращений у випуску 14 (NB-IoT Категорія NB1). Існує два типи носіїв в NB-IoT:

- якірний носій, де припускається, що крім того будуть передаватися сигнали синхронізації;
- неякірний носій, де UE не припускає, що сигнали синхронізації передаються.

Пристрій NB-IoT можна запланувати за допомогою якірного носія або неякорного носія для надсилання та отримання даних користувача за допомогою NPUSCH (вузькосмуговий фізичний канал висхідного зв'язку) або NPDSCH (вузькосмуговий фізичний канал зворотного зв'язку). Щоб користуватися мережевими сервісами 5G пристрій NB-IoT потрібно зареєструвати в системі 5G. У системі 5G є можливість зареєструватися без підключення до даних. Якщо пристрої NB-IoT повинні надсилати або отримувати дані до або від сервера додатків IoT (AS), то вони можуть подати запит на встановлення з'єднання даних/сеансу PDU, який може базуватися на Unstructured, Ethernet та IP. Для наступних технологій потрібна проміжна точка збору інформації.



Рисунок 2.5 Централізована мережа Wi-Fi для збору інформації на інтелектуальний концентратор

Прикладом організації взаємодії через поміжну точку є використання Wi-Fi. Основою мережі є точка доступу (AP). Основним завданням точки

доступу є передача бездротового сигналу. Для підключення до точки доступу та підключення до бездротової мережі пристрої повинні бути оснащені адаптерами бездротової мережі.

Точка доступу надсилає ідентифікатор мережі, використовуючи спеціальні пакети. Швидкість передачі цих пакетів 0,1 Мбіт/с кожні 0,1 с. Клієнт, знаючи ідентифікатор мережі, перевіряє можливість підключення до даної точки доступу. Якщо в зоні дії дві точки доступу з однаковими ідентифікаторами мережі, приймач має можливість вибрати між ними, орієнтуючись на рівень сигналу. Топологія мережі з об'єднаними точками доступу в єдину мережу під управлінням контролера представлена на рис.2.5.



Рисунок 2.6. Сітчаста топологія BLE для збору інформації

Bluetooth зі зменшеним енергоспоживанням (BLE). Бездротова технологія BLE може використовуватися для мінімізації швидкості з'єднання з пристроями. На відміну від класичного Bluetooth, BLE постійно знаходиться в сплячому режимі, за винятком випадків, коли встановлюється з'єднання, що зменшує енергоспоживання в режимі простою. Фактичний час з'єднання становить всього кілька мілісекунд. Причина, по якій з'єднання займають так мало часу, в тому, що швидкість передачі даних дуже висока – 1 Мбіт/с. Сітчаста топологія використовується при наявності декількох ведучих вузлів BLE. (див. рис. 2.6). У цій топології один вузол функціонує як центральний і діє як головний, а всі інші вузли функціонують як ведучі та

підлеглі вузли.

Технологія ZigBee для збору інформації, насамперед, в промисловості, використовує сітчасту топологію (див. рис.2.7), оскільки надмірність є важливим фактором. Швидкість передачі даних 250 кбіт/с підходить для періодичної і проміжної двосторонньої передачі даних між датчиками і координатором. У сітчастій топології мережа Zigbee розширюється декількома маршрутизаторами, де координатор відповідає за їх запуск. Ці структури дозволяють будь-якому пристрою зв'язуватися з будь-яким іншим сусіднім вузлом для забезпечення надмірності даних. Якщо який-небудь вузол виходить з ладу, інформація автоматично направляється на інший пристрій.



Рисунок 2.7. Сітчаста топологія ZigBee з маршрутизацією для збору інформації

При використанні Z-Wave мережа складається з контролерів і підлеглих пристроїв (див. рис.2.8). Рекомендується мати пристрій Z-Wave приблизно кожні 10 метрів або ближче для максимальної ефективності. Контролер, який створює мережу Z-Wave, є основним контролером. Цей первинний контролер являється головним контролером у мережі. Основний контролер має можливість включати і виключати вузли мережі, а також піклується про управління розподілом ідентифікаторів вузлів. Контролери, які додаються в мережу Z-Wave з використанням основного контролера,

називаються вторинними контролерами. Підлеглі пристрої - це вузли, які відповідають на команди або виконують їх. Підлеглі вузли також направляють команди іншим вузлам в мережі.



Рисунок 2.8. Приклад топології Z-Wave

Протоколи для передачі даних.

Протокол CoAP призначений для передачі між пристроями в одній обмеженій мережі, наприклад, з низьким енергоспоживанням, в мережах з втратами, а також між пристроями в різних мережах, з'єднаних Інтернетом. CoAP організований в два рівня:

- рівень повідомлень;
- рівень запит / відповідь.

На рис.2.9 показана структура протоколи для передачі даних CoAP.

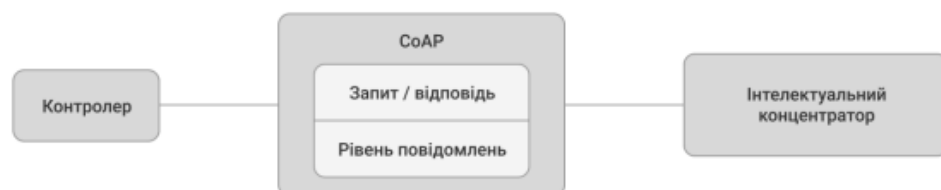


Рисунок 2.9. Структура CoAP для передачі інформації

Рівень повідомлень Рівень повідомлень обробляє єдиний обмін повідомленнями між кінцевими точками. Повідомлення обміну на цьому рівні можуть бути чотирьох типів:

- Confirmable (вимагає підтвердження);
- Non-confirmable (не вимагає підтвердження);
- Квитування (підтверджує отримання Confirmable повідомлення);
- Reset (вказує на те, що Confirmable повідомлення було отримано, але контекст, що підлягає обробці, відсутній).

Даними повідомленнями CoAP забезпечує механізм власної надійності. Рівень повідомлень також забезпечує підтримку багатоадресної передачі. Рівень запит / відповідь CoAP підтримує URI (універсальний ідентифікатор ресурсу), що дозволяє одержувачеві визначати повноваження, шлях і ідентифікацію ресурсу. CoAP підтримує наступні методи:

- 1) GET. Метод GET використовується для отримання будь-якої інформації, ідентифікованої URI-запиту;
- 2) POST. Метод POST служить для запитів, при яких сервер приймає дані, поміщені в тіло повідомлень, для зберігання;
- 3) PUT. Метод PUT запитує, щоб ресурс, ідентифікований URI-запиту, був оновлений або створений з вкладеним тілом повідомлення. Якщо ресурс існує по цьому URI, тіло повідомлення буде вважатися модифікованою версією цього ресурсу. Якщо ресурс не існує, сервер може створити новий ресурс з цим URI. Якщо ресурс не може бути створений або змінений, тоді слід відправити відповідний код помилки;
- 4) DELETE. Метод DELETE запитує видалення ресурсу, ідентифікованого URI-запиту.

С точки зору безпеки, протокол CoAP побудований з DTLS, який забезпечує ті ж гарантії, що й TLS, але він працює поверх UDP. CoAP може бути інтегрований з такими форматами даних, як XML, JSON, Protobuf для ефективного зв'язку з іншими платформами.

Протокол MQTT забезпечує мінімальні вимоги до ресурсів та використовується для передачі інформації. MQTT працює з моделлю клієнт-сервер, де кожен контролер є клієнтом і з'єднаний з інтелектуальним концентратором, який є брокером. Наявність брокера обов'язкова, оскільки він керує розподілом даних підписникам. Всі контролери посилають дані тільки брокеру і приймають дані теж тільки від нього. На рис.2.10 показана структура роботи протоколу MQTT.

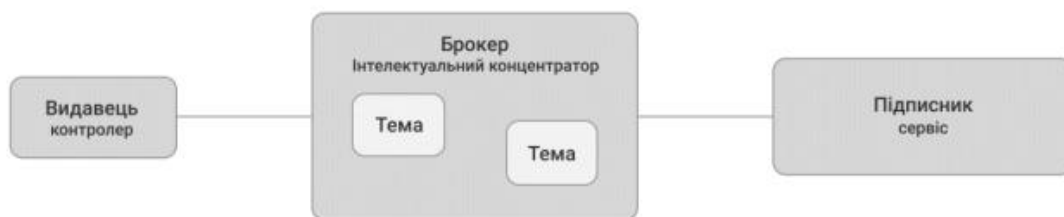


Рисунок 2.10 Структура роботи протоколу MQTT для передачі інформації

У мережі на базі протоколу MQTT розрізняють 3 об'єкти:

- 1) видавець - MQTT-клієнт, який при виникненні певної події передає брокеру інформацію про неї, публікуючи відповідні топіки (теми);
- 2) брокер - MQTT-сервер, який приймає інформацію від видавців і передає її відповідним підписникам. Різні брокери можуть з'єднуватися між собою, якщо вони підписуються на повідомлення один одного;
- 3) підписник - MQTT-клієнт, який після підписки на брокера більшу частину часу "слухає" його і постійно готовий до прийому і обробки вхідного повідомлення.

Коли видавець відправляє дані брокеру, це називається «публікацією». Коли підписник хоче отримати дані від брокера, він «підписується» на тему. В подальшому він буде отримувати всі повідомлення, опубліковані на цю тему. Видавець також відправляє з самим повідомленням рівень QoS (якість обслуговування). Цей рівень визначає гарантію доставки повідомлення. Ці рівні QoS наступні:

- 1) QoS0 - повідомлення передається тільки один раз і не вимагає підтвердження. Цей рівень не повинен використовуватися для критично важливої інформації, так як існує ризик того, що підписники не отримають повідомлення;
- 2) QoS1 - повідомлення відправляється мінімум один раз і вимагає підтвердження від брокера щодо конкретного повідомлення;
- 3) QoS2 - видавець і брокер працюють разом, щоб гарантувати, що брокер отримає і відреагує на повідомлення рівно один раз. Це вимагає додаткових витрат оскільки використовується механізм чотирьохетапного підтвердження пакетів. Хоча це найбезпечніший рівень QoS, він також самий повільний і тому використовується тільки при необхідності. Більшість MQTT-брокерів підтримує використання TLS, що дозволяє додаткам захистити обмін конфіденційними даними. Стандартний порт для захищеного MQTT-з'єднання має номер 8883. Протокол не вводить обмежень на формат даних.

Процес передачі пакетів від IoT до IoT всередині кластеру здійснюється за наступними принципами:

1. Передача пакетів між окремими пристроями IoT здійснюється за синхронно-часовим методом окремими кадрами даних. На каналному рівні канал передачі функціонує циклічно. В кожному циклі кожному пристрою IoT відведене окремо часове вікно. Кількість вікон в кожному циклі дорівнює кількості пристроїв IoT. В одному циклі кожен пристрій IoT може передати/прийняти тільки частину всього пакету (так званий кадр). В кожному циклі в своє часове вікно має право передати/прийняти один кадр тільки один визначений пристрій IoT. Якщо кадрів на передачу/приймання немає, то канал простоює. Також за тривалість часового вікна пристрою, що приймає, потрібний час для передачі квитанції щодо приймання пристрою, що передав кадр, а також декодувати як сам кадр, так і квитанцію

Таким чином:

- фізичні пристрої IoT слід розглядати тільки як джерело потоку інтенсивністю λ ;

- СМО мережі IoT слід будувати з рівня роутера (коммутатора, концентратора, основного контролера). Paketний запит може утворюватися як на вхідних портах, так і на вихідних портах;

- мережу IoT можливо представити як СМО з пуасонівським потоком запитів на обслуговування та з дисципліною обслуговування черги типу FIFO:

а) з одним каналом обслуговування (Π), з відповідною інтенсивністю вхідного потоку запитів λ та відповідними середніми інтервалами між ціми запитами a , інтенсивністю μ їх обслуговування в комутаторі, які мають експоненційні закони розподілу, а середнє значення тривалості обслуговування – \bar{x} ;

б) з чергою обмеженого розміру (з втратами) або ні. Розташування і ступінь черги (або в чергах вхідних портів, або в чергах вихідних портів) буде залежати від навантаження на трафік та відносної швидкості комутації. Оскільки в міру того, як ці черги стають великими, пам'ять комутатора в кінцевому підсумку може бути вичерпана, і втрата пакетів відбудеться, коли немає пам'яті для зберігання прибулих пакетів. Фактично розмір черги є значно великим, то таку СМО можна рахувати і як з чергою необмеженого розміру (без втрат);

- обслуговування запитів здійснюється без пріоритетів.

Для компактного опису така СМО за символікою Кендалла описується як $M/M/1/\infty$, де M – пуасонівський розподіл запитів на обслуговування як на вході коммутатора, так і його виході. Схематичне зображення СМО мережі IoT зображене на рис.2.11.

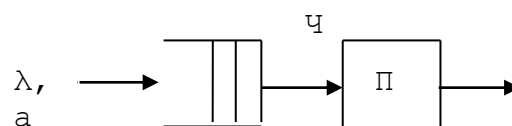


Рисунок 2.11. Схематичне зображення СМО мережі IoT

- параметри якості обслуговування всередині мережі IoT (QoS_{IoT}) не

відповідають параметрам якості обслуговування мережі 5G (QoS_{5G}), тому ці дві множини параметрів не перетинаються (рис.2.12).

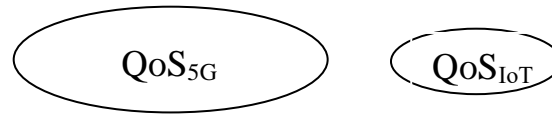


Рисунок 2.12. Множини припустимих значень параметрів якості обслуговування

Визначити стаціонарний розподіл ймовірностей станів системи, яка складається з пристроїв IoT та комутатора, P_k ($k = 0 \dots \infty$) можливо наступним чином [76].

Дискретні стани системи S_k змінюються з кожною подією, коли надходить запит або коли він обслугований. Такій ланцюг Маркова з безскінченним числом станів наводиться у вигляді діаграми переходу (рис. 2.13).

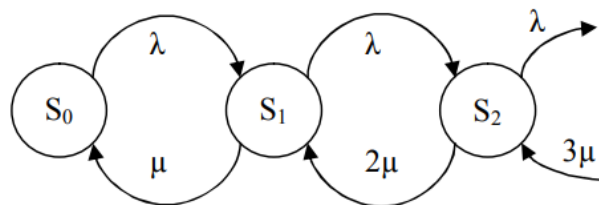


Рисунок 2.13. Ланцюг Маркова для комутатора мережі IoT

Для звичайного потоку інтенсивність надходження запитів від IoT збігається з параметром λ , а інтенсивності обслуговування комутатора розраховується як обернена його тривалість обслуговування:

$$\mu = \frac{1}{x}. \quad (2.8)$$

Вирогідність зайнятості комутатора визначається наступним чином:

$$P_1 = \frac{\lambda}{\mu} \cdot P_0. \quad (2.9)$$

Стаціонарний розподіл ймовірностей станів системи P_k для всіх можливих значень k місця очікування черги:

$$P_k = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{k-1} \cdot P_1, (k = 2 \dots \infty). \quad (2.10)$$

Імовірність P_0 для цього випадку виявляється з умови нормування:

$$\sum_{k=0}^{\infty} P_k = 1. \quad (2.11)$$

Імовірність того, що до коммутатора від пристроїв IoT немає запитів:

$$P_0 = \frac{\mu - \lambda}{\lambda}. \quad (2.12)$$

Оскільки $\Lambda = \frac{\lambda}{\mu}$, то рівняння остаточного визначення стаціонарного розподілу ймовірності станів системи можна записати в одній системі рівнянь наступним чином:

$$\begin{cases} P_1 = \Lambda \cdot P_0 \\ P_k = \Lambda^{k-1} \cdot P_1, (k = 2 \dots \infty). \\ P_0 = \frac{\Lambda}{1 - \Lambda} \end{cases} \quad (2.13)$$

Параметри якості обслуговування пакетів даних від пристроїв IoT в комутаторі кластеру плануються при побудові вхідного для транспортної мережі кластеру IoT, оптимізуються при проходженні через саму транспортну мережу та контролюються у вихідному кластері IoT.

Мережа 5G може бути розглянута як одноканальна СМО з відносними пріоритетами, з необмеженою чергою, з неоднорідним потоком запитів. Для

компактного опису така СМО за символюю Кендалла описується як $M/G/1/\infty/p$, де M – пуасонівський розподіл запитів на обслуговування на вході системи, G – пуасонівський розподіл запитів на обслуговування на виході системи, 1 – система з одним коммутатором, ∞ – необмежена черга (реально – значно велика), p – з відносними пріоритетами обслуговування запитів (рис.2.14).

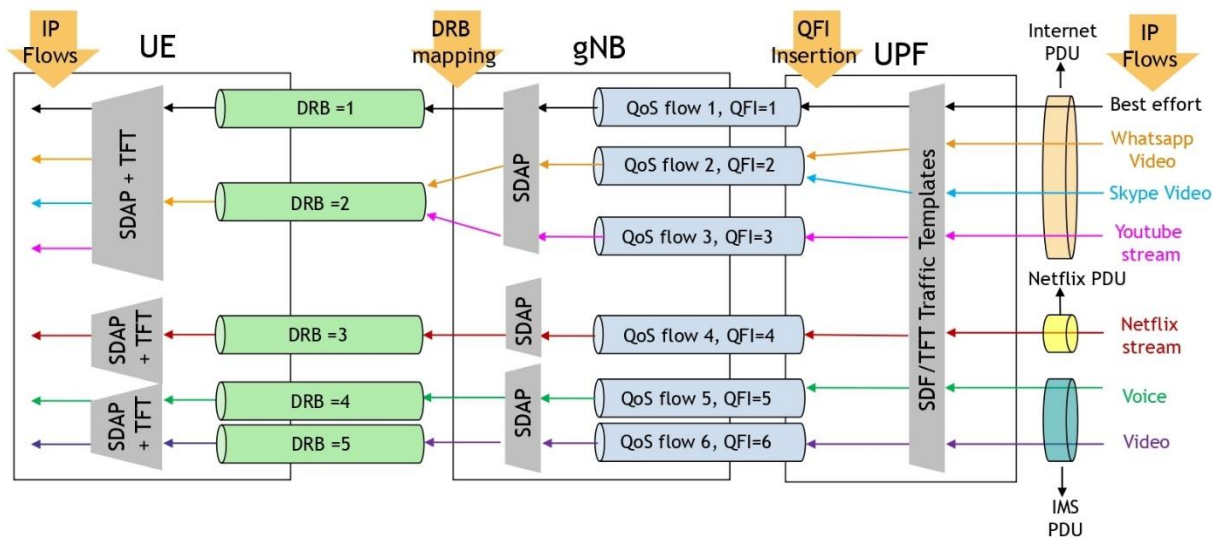


Рисунок 2.14. Обробка пріоритетних потоків у мережі 5G

Вхідним потоком запитів для СМО 5G є вихідний потік запитів від СМО IoT ($M/M/1/\infty$), тобто типу M . Вихідний потік запитів загального виду типу G зформований за рахунок того, що на вході СМО 5G потік є неоднорідним, т.к. запити відрізняються за класами (відео, голос та ін.) та декількома пріоритетами, а також тому, що мережа 5G є мультисервісною і на їх вхід, крім IoT, поступають потоки з різною бітовою швидкістю і з різною довжиною пакетів. Схематичне зображення СМО мережі 5G зображене на рис.2.15.

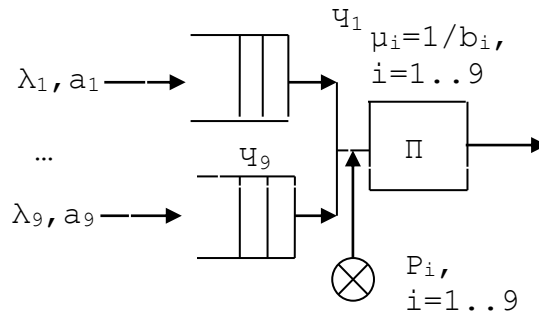


Рисунок 2.15. Схематичне зображення СМО мережі 5G

Встановлення пріоритетів для запитів, що очікують на обслуговування, є одним з ефективних способів управління розміром черги і часом перебування запиту в ньому. В мережі стандарту 5G існують потоки 9 класів обслуговування з відповідними інтенсивностями вхідних потоків λ_i та відповідними середніми інтервалами між цими запитами a_i , то визначене 9 пріоритетів (QFI). Для відносного пріоритету, коли в мережу 5G надходить запит високого пріоритету обслуговування, то такий запит стає на початок черги ще необслугованих запитів, що графічно зображене на рис.2.16, де під 1,2,3,...,9 зображені черги відповідних номерів пріоритетів.

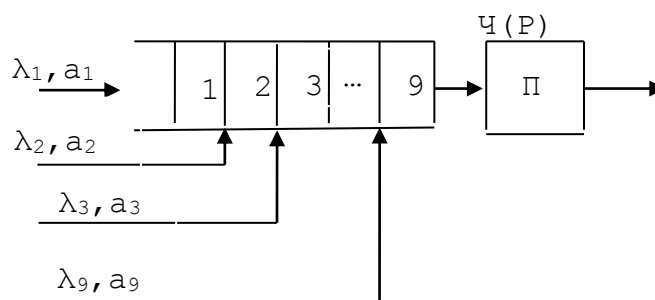


Рисунок 2.16. Схематичне зображення формування черги мережі 5G

Запропонована концептуальна модель взаємодії мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей може бути застосована для розробки математичної моделі забезпечення якості обслуговування в IoT в мережі мобільного зв'язку

та розробки методології застосування різних методів збільшення якості обслуговування в мережі IoT.

2.3. Розробка математичної моделі забезпечення якості обслуговування в мережі Інтернету речей

Система стільникового зв'язку, як і будь-яка система телефонного зв'язку, є прикладом системи масового обслуговування з випадковим потоком заявок (викликів), випадковою тривалістю їх обслуговування (сеансів зв'язку) і кінцевим числом каналів обслуговування (фізичних каналів). Очевидно потік викликів, що генерується користувачами мережі, носить випадковий характер.

Точне визначення та параметри якості обслуговування головним чином визначаються типом аплікації. Сервіс (якість обслуговування) описується низкою параметрів. Так, наприклад, для передачі голосового трафіка найважливішими параметрами QoS є середня затримка та її варіація (джитер) на певному інтервалі часу, у той час як втрата деякої частини пакетів припустима.

Параметри якості обслуговування можливо розбити на три групи:

- швидкісні показники або параметри пропускну здатності (мінімальна, середня та максимальна швидкість передачі пакетів);
- часові показники або параметри затримок передачі пакетів (середні та максимальні величини затримок і джитеру);
- надійнісні показники або параметри надійності передачі (імовірність втрат, викривлення пакетів та імовірність доставки пакетів).

Вимірювання зазначених параметрів здійснюється на певному інтервалі часу. Чим менше цей часовий інтервал, тим жорсткіші вимоги пред'являються до мережі, а отже, до всіх її елементів, оскільки забезпечення QoS «із кінця в кінець» вимагає взаємодії всіх вузлів на шляху пакетів трафіка й визначається надійністю, функціональністю та продуктивністю

«слабкої ланки».

Кількісно ступінь чутливості аплікацій до тих чи інших параметрів оцінюється за відповідними показниками якості обслуговування (рис.2.11).

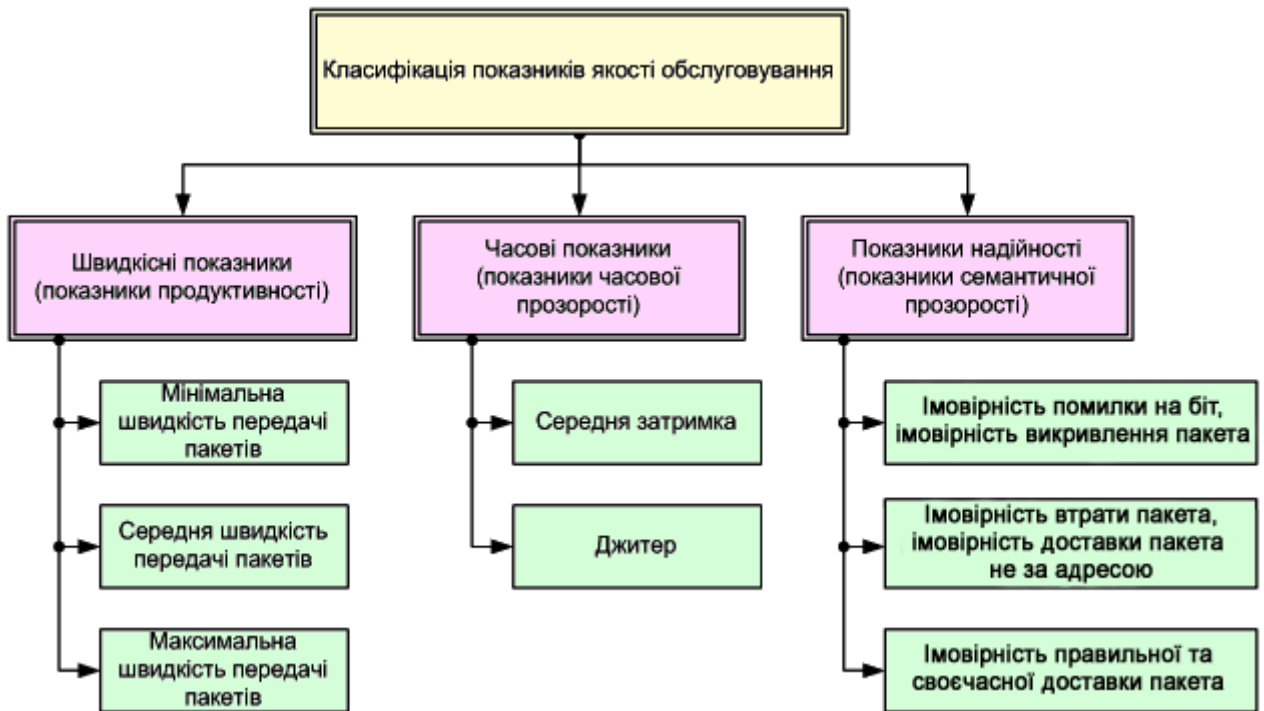


Рисунок 2.11. Класифікація показників якості обслуговування

Однією з ключових особливостей 5G-мереж є можливість одночасної підтримки додатків з різними вимогами до якості обслуговування. З метою забезпечення відповідності параметрам QoS для кожного з додатків створюються різні передові системи обробки пакетів [176]. Основними з них є два типи з'єднань:

- з'єднання з гарантованою мінімальною швидкістю (GBR);
- з'єднання з негарантованою швидкістю передачі (Non-GBR).

Гарантовані з'єднання передаються з мінімальною фіксованою швидкістю передачі, але при наявності вільних ресурсів в мережі є можливість передачі зі швидкістю, більшою за встановлену мінімальну. При встановленні Non-GBR-з'єднань мережа не гарантує навіть мінімальну швидкість передачі даних, тому в разі перевантаження пакети даних можуть

бути втрачені для цих з'єднань. На радіоінтерфейсі між базовою станцією eNodeB і призначеним для користувача обладнанням UE за забезпечення параметрів QoS відповідає сам eNodeB. Кожному інформаційному потоку присвоюється QoS клас сервісного параметра 5QI. Кожен клас обслуговування QoS має кілька ідентифікаторів 5QI.

У мережі 5G може використовуватися механізм ідентифікатора класу якості обслуговування QCI, який називається 5QI.

5QI - це механізм, в якому пакети класифікуються на різні класи QoS. Таким чином, QoS можна адаптувати до конкретних вимог. В результаті деякі пакети можуть отримати кращий QoS, ніж інші пакети. Враховуючи архітектуру, коли послуги доступу до Інтернету надаються через мережеві зрізи паралельно зі спеціалізованими послугами в інших зрізах, 5QI може бути використаний як захід управління трафіком, щоб запропонувати послуги доступу до Інтернету, що відповідають правилам розумного управління трафіком для надання різних «категорій трафіку».

Кожен ідентифікатор QFI (див. табл.1.2) [176, 195] визначає значення наступних параметрів QoS: пріоритет, допустима затримка і допустима кількість втрачених пакетів. Всі можливі значення ідентифікатора QCI, а також значення параметрів QoS, пов'язані з конкретними ідентифікаторами QCI, визначені у відповідній специфікації. Це допомагає домогтися того, щоб однотипні потоки оброблялися на обладнанні різних виробників. В рамках вимог класів QoS всі види послуг діляться на 9 типів, кожен з яких відповідає ідентифікатору QCI. При передачі даних з гарантованою швидкістю базова станція eNodeB повинна динамічно управляти ресурсами. Параметри класу QoS 1,2, 3 і 7 - це послуги, що надаються абоненту в режимі реального часу по протоколу UDP/IP. Основним обмежуючим фактором при їх застосуванні є допустима затримка доставки посилок. Допустиме значення затримки визначається між комутатором PDN і призначеним для користувача обладнанням UE.

Показником надійності пакетів є коефіцієнт втрати пакетів PERL, якій

оцінюється тільки при доставці пакетів по протоколу TCP / IP. Тому, якщо величина допустимих втрат менше 10^{-6} , використовується підтверджуюча передача. Найвищий пріоритет (клас 1) має найнижчий параметр, він відноситься до трафіку управління мережею. Клас 9 використовується за замовчуванням при доставці IP-трафіку (читання файлів з інтернету, електронної пошти, відео) непривілейованим користувачам, у т.ч. і пристроям IoT.

Таким чином, для забезпечення заданої якості обслуговування всіх користувачів заданого осередку мережі 5G необхідно ввести пороги для певних видів трафіку. При цьому мережа не повинна бути перевантажена і не повинно бути порушення її цілісності, так як через втрату хоча б одного пакета часто може бути втрачено все повідомлення. Крім того, необхідно боротися з перевантаженнями, що виникають через те, що запити на голосові з'єднання безконтрольно захоплюють мережеві ресурси. Щоб правильно визначити порогові значення, необхідно ввести функцію втрат, яка буде характеризувати втрату трафіку при недотриманні допустимої затримки. Наприклад, коли канал практично без навантаження, користувачі мають рівні пріоритети і отримують швидкості відповідно до запитів. Однак, коли на фрагменті мережі виникають затори, модуль управління базовою станцією eNodeB повинен ввести пріоритети для трафіку.

У загальному випадку процес обслуговування запиту IoT до іншого IoT в мережі 5G може бути представлений наступною схемою (рис.2.12), тобто послідовно від IoT кластеру Кл1 через транспортні мережі ТМ1 та ТМ2 до IoT кластеру Кл2.

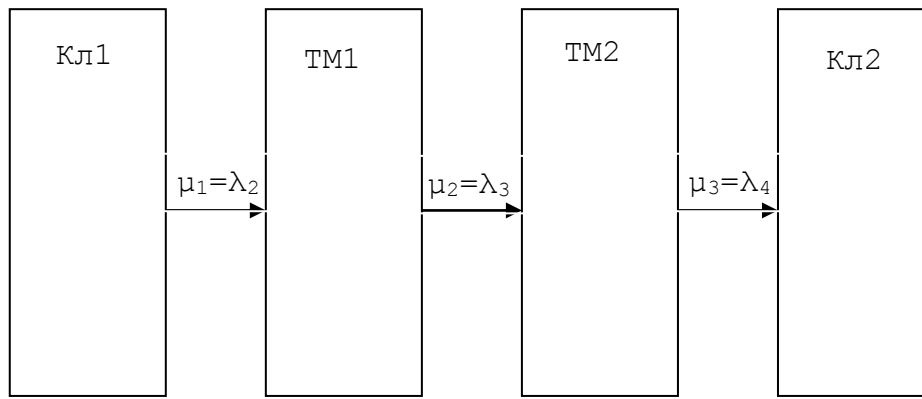


Рисунок 2.12. Послідовність обслуговування запитів IoT в мережі 5G

Будь-який пристрій IoT може бути підключений до мережі 5G безпосередньо або у складі свого кластеру пристроїв. Нехай пристрій, якій надав запит на обслуговування в мережу 5G, належить до одного кластеру (Кл1) з інтенсивністю обслуговування μ_1 , а пристрій IoT, якій приймає запит на обслуговування з інтенсивністю λ_4 , належить до іншого кластеру (Кл2). Для випадку безпосереднього підключення кластер складається з одного пристрою. На рис.2.12 розглянутий найгірший сценарій, коли транспортна мережа складається з двох мереж: ТМ1 з інтенсивністю вхідного потоку λ_2 та інтенсивністю обслуговування μ_2 і ТМ2 з інтенсивністю вхідного потоку λ_3 та інтенсивністю обслуговування μ_3 . Це відповідає більш загальному випадку, коли передаючий та приймаючий кластери належать до різних мереж (обслуговуються різними операторами мобільного зв'язку). В якості аналітичної моделі процесу обслуговування запитів в такій мережі будемо використовувати мережу систем масового обслуговування (СМО).

Мережа СМО складається з чотирьох окремих систем масового обслуговування $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ без втрат, де S_1 – кластер Кл1, S_2 – транспортна мережа ТМ1, S_3 – транспортна мережа ТМ2, S_4 – кластер Кл2. Топологія такої мережі СМО надана на рис.2.13.

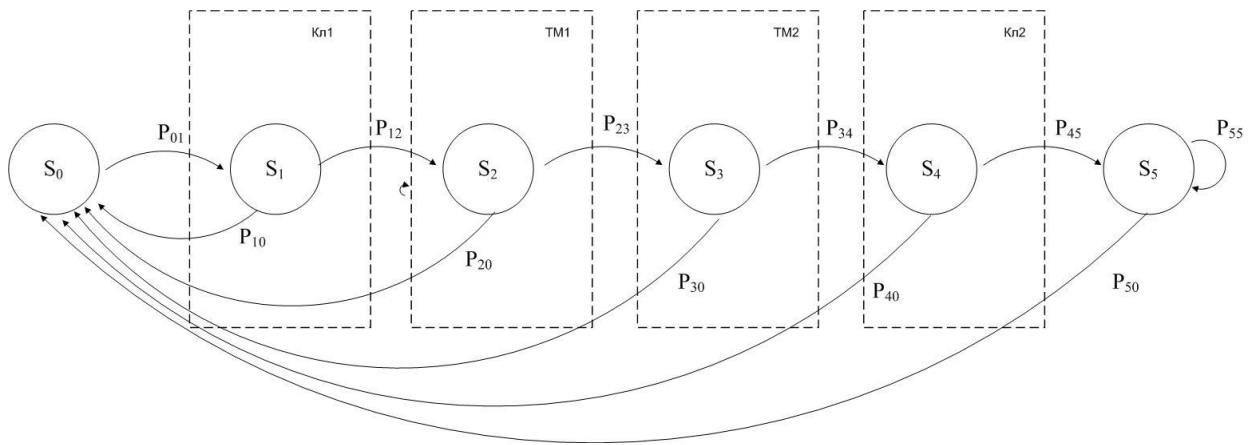


Рисунок 2.13. Топологія мережі СМО

Запити на обслуговування від IoT зі станом S_0 з імовірністю P_{01} надходять в 1-у СМО, де запит обслуговується в кластері Кл1 зі станом S_1 . В подальшому запит, якій пройшов обслуговування на i -й СМО, з імовірністю P_{ij} надходить для обслуговування в j -ту СМО або з імовірністю P_{i0} залишає систему. Запит на обслуговування до кінцевого пристрою IoT зі станом S_5 з імовірністю P_{45} надходить з 4-й СМО, де запит обслуговується у кластері Кл2 зі станом S_4 , потім з імовірністю P_{50} залишає систему або з імовірністю P_{55} остається.

Функціонування такої мережі описується стохастичною матрицею передач мережі

$$[P] = \begin{bmatrix} 0 & P_{01} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{10} & 0 & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{20} & 0 & 0 & P_{23} & 0 & 0 \\ P_{30} & 0 & 0 & 0 & P_{34} & 0 \\ P_{40} & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{45} \\ P_{50} & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{55} \end{bmatrix},$$

де $0 \leq P_{ij} \leq 1, i = \overline{1,5}, j = \overline{1,5}$ - імовірність переходу з i -й СМО в j -ту. До того ж сума ймовірностей цієї матриці по строкам дорівнює одиниці:

$$\sum_{j=1}^5 P_{ij} = 1, \quad (2.14)$$

тобто

$$P_{12} + P_{10} = 1, P_{20} + P_{23} = 1, P_{30} + P_{34} = 1, P_{40} + P_{45} = 1, P_{50} + P_{55} = 1.$$

Така система у стаціонарному режимі й при пуасонівських потоках подій для i -й СМО має сумарну інтенсивність потоку запитів λ_i , які надходять у цю систему за одиницю часу, а μ_i - середня інтенсивність потоку обслуговування запитів в i -й СМО мережі. Інтенсивність потоку на виході з цієї системи також дорівнює λ_i , бо система без втрат.

Отже, для стаціонарного режиму на підставі формули повної імовірності

$$\lambda_i = \sum_{j=0}^5 \lambda_j P_{ji}, \quad i = \overline{0,5} \quad (2.15)$$

або в матричному вигляді

$$[\Lambda] = [P^T] \cdot [\Lambda], \quad (2.16)$$

де $[P^T]$ - матриця, транспонована до матриці $[P]$,

$\lambda_0 = \sum_{j=1}^5 \lambda_{0j}$ - сумарна інтенсивність джерел запитів,

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_5 \end{bmatrix} - \text{матриця-стовпець } \lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_5;$$

P_{ji} - імовірність того, що запит, який був обслугований на j -й СМО, надходить у систему та не залежить від попереднього шляху цього запиту й стану мережі.

Щоб ця система мала нетривіальний розв'язок $\lambda_i \neq 0$, необхідно, щоб визначник її системної матриці дорівнював нулю:

$$|[P]^T - I| = \begin{vmatrix} -1 & P_{10} & P_{20} & P_{30} & P_{40} & P_{50} \\ P_{01} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{12} & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{23} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{34} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{45} & P_{55} - 1 \end{vmatrix} = 0, \quad (2.17)$$

де I – одинична матриця порядку 6.

Такий визначник буде дорівнювати нулю, якщо розв'язати систему неоднорідних рівнянь та всі $\lambda_i, i = \overline{1,5}$ виразити через λ_0 як $\lambda_i = \alpha_i \lambda_0, i = \overline{1,5}$:

$$\begin{cases} P_{01} \cdot \lambda_1 + 0 \cdot \lambda_2 + 0 \cdot \lambda_3 + 0 \cdot \lambda_4 + 0 \cdot \lambda_5 = 1 \cdot \lambda_0 \\ (-1) \cdot \lambda_1 + P_{12} \cdot \lambda_2 + 0 \cdot \lambda_3 + 0 \cdot \lambda_4 + 0 \cdot \lambda_5 = P_{10} \cdot \lambda_0 \\ 0 \cdot \lambda_1 + (-1) \cdot \lambda_2 + P_{23} \cdot \lambda_3 + 0 \cdot \lambda_4 + 0 \cdot \lambda_5 = P_{20} \cdot \lambda_0 \\ 0 \cdot \lambda_1 + 0 \cdot \lambda_2 + (-1) \cdot \lambda_3 + P_{34} \cdot \lambda_4 + 0 \cdot \lambda_5 = P_{30} \cdot \lambda_0 \\ 0 \cdot \lambda_1 + 0 \cdot \lambda_2 + 0 \cdot \lambda_3 + (-1) \cdot \lambda_4 + P_{45} \cdot \lambda_5 = P_{40} \cdot \lambda_0 \\ 0 \cdot \lambda_1 + 0 \cdot \lambda_2 + 0 \cdot \lambda_3 + 0 \cdot \lambda_4 + (P_{55} - 1) \cdot \lambda_5 = P_{50} \cdot \lambda_0 \end{cases} \quad (2.18)$$

Приклад рішення цієї системи рівнянь наданий у Додатку А. Під час розрахування характеристик мережі СМО доцільно знати час перебування запиту в мережі T . Якщо відомо середній час перебування запиту в кожній СМО мережі τ_i , то

$$T = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \tau_i. \quad (2.19)$$

За цим прикладом зрозуміло, що така система рівнянь має єдиний розв'язок відносно λ_i виду $\lambda_i = \alpha_i \lambda_0, i = \overline{1,5}$. Щоб у мережі СМО виник стаціонарний режим, потрібно, щоб кожна СМО, яка входить до мережі, функціонувала в стаціонарному режимі. Оскільки СМО, які входять в мережу, є системами без втрат, то для створення стаціонарного режиму необхідно для кожної СМО забезпечити виконання умови

$$\lambda_0 < \min_{i=1,5} \frac{\mu_i}{\alpha_i}. \quad (2.20)$$

Важливо відзначити, що через послідовний характер передачі пакетів різними елементами мережі сумарна пропускна здатність мережі буде дорівнює мінімуму пропускної здатності складових елементів на всьому шляху (рис.2.12):

$$R_{CMO} = \min \{R_{K1}, R_{TM1}, R_{TM2}, R_{K2}\}. \quad (2.21)$$

де R_{K1} та R_{K2} - пропускні здатності кластерів Кл1 та Кл2 відповідно, а R_{TM1} та R_{TM2} - пропускні здатності транспортних мереж ТМ1 та ТМ2 відповідно.

2.3.1. Показники якості обслуговування для мережі IoT

Основною характеристикою якості обслуговування даної системи є ймовірність очікування $P_{w>0}$ ($W > 0$ означає, що є тайм-аут), яку можна визначити з функції розподілу станів системи P_k . В умовах потоку Пуассона $P_{w>0}$ дорівнює ймовірності зайнятості комутатора з урахуванням всіх можливих станів черги (комутатор зайнятий і 0 запитів в черзі, комутатор зайнятий і 1 запит в черзі, 2 запитів в черзі і т.д.):

$$P_{w>0} = \sum_{k=1}^{\infty} P_k = \frac{\Lambda}{1-\Lambda} \cdot P_0, \quad (2.22)$$

де k - стан системи ($0 < k < 1$ - комутатор, $1 < k < \infty$ - черга);

$\Lambda = \frac{\lambda}{\mu}$ - коефіцієнт завантаження системи;

P_0 - ймовірність того, що в системі немає необроблених запитів від IoT;

P_k - ймовірність k -го місця запиту у черзі.

Середня довжина черги Q (середня кількість вимог у черзі) можна знайти з розподілу ймовірностей станів системи P_k при $k=2, 3, \dots, \infty$ (у черзі запитів 1, 2 тощо) за правилом розрахунку математичного сподівання:

$$Q = \sum_{k=2}^{\infty} (k-1) \cdot P_k = \Lambda \cdot P_0 \sum_{k=2}^{\infty} (k-1) \cdot \Lambda^{k-1} = \Lambda \cdot P_0 \cdot \frac{\Lambda}{(1-\Lambda)^2} = \frac{\Lambda}{1-\Lambda} \cdot P_{w>0}, \quad (2.23)$$

де k - номер запиту у черзі;

$\Lambda = \frac{\lambda}{\mu}$ - коефіцієнт завантаження системи;

$P_{W>0}$ - імовірність очікування у черзі.

Середній час очікування для будь-якого запиту W знаходиться за формулою Литла, де за W одиниць часу очікування в черзі надійде в середньому $Q = \Lambda W$ запитів:

$$W = \frac{Q}{\Lambda} = \frac{1}{1 - \Lambda} \cdot P_{W>0}, \quad (2.24)$$

де Q - середня довжина черги;

$\Lambda = \frac{\lambda}{\mu}$ - коефіцієнт завантаження системи;

$P_{W>0}$ - імовірність очікування у черзі.

2.3.2. Показники якості обслуговування для мережі 5G

Середній час очікування в черзі запиту p -го пріоритету в пристрої комутації визначається наступним чином:

$$W_p = W_0 + \sum_{i=1}^p \bar{x}_i (\bar{N}_{ip} + \bar{M}_{ip}), \quad p = \overline{1,9} \quad (2.25)$$

де $W_0 = \sum_{i=1}^p \rho_i \frac{\bar{x}_i^2}{2\bar{x}_i} = \sum_{i=1}^p \frac{\lambda_i \bar{x}_i^2}{2}$ - середня затримка вимоги p -пріоритету, яка

пов'язана з наявністю іншого запиту на обслуговування в комутаторі;

- \bar{x}_i - середній час обслуговування запитів i -го пріоритетного класу в комутаторі;

- λ_i - інтенсивність надходження запитів i -го пріоритетного класу;

- ρ_i - коефіцієнт навантаження коммутатора запитами i -го пріоритетного

класу;

- x_i^2 - другий момент часу для обслуговування запиту i -го пріоритетного класу;

- $N_{ip} = \lambda_i \overline{W_i}$, $i = \overline{p, P}$ - кількість запитів i -го пріоритетного класу на момент надходження чергового запиту i -го пріоритетного класу, які вже були в черзі запитів i -го пріоритетного класу та які будуть обслуговуватися перед ним;

- $M_{ip} = \lambda_i W_p$ - кількість запитів i -го пріоритетного класу на момент надходження чергового запиту i -го пріоритетного класу, які вже були в черзі запитів більш пріоритетного класу та які будуть обслуговуватися перед ним.

Рішення щодо W_i отримуються рекурентно:

$$W_1 = \frac{W_0}{(1-\sigma_0)(1-\sigma_1)}, \text{ де } \sigma_0 = \rho_0, \sigma_1 = \rho_1;$$

$$W_2 = \frac{W_0}{(1-\sigma_1)(1-\sigma_2)}, \text{ де } \sigma_2 = \sum_{i=1}^2 \rho_i;$$

$$W_3 = \frac{W_0}{(1-\sigma_2)(1-\sigma_3)}, \text{ де } \sigma_3 = \sum_{i=1}^3 \rho_i;$$

$$W_4 = \frac{W_0}{(1-\sigma_3)(1-\sigma_4)}, \text{ де } \sigma_4 = \sum_{i=1}^4 \rho_i;$$

$$W_5 = \frac{W_0}{(1-\sigma_4)(1-\sigma_5)}, \text{ де } \sigma_5 = \sum_{i=1}^5 \rho_i;$$

$$W_6 = \frac{W_0}{(1-\sigma_5)(1-\sigma_6)}, \text{ де } \sigma_6 = \sum_{i=1}^6 \rho_i;$$

$$W_7 = \frac{W_0}{(1-\sigma_6)(1-\sigma_7)}, \text{ де } \sigma_7 = \sum_{i=1}^7 \rho_i;$$

$$W_8 = \frac{W_0}{(1-\sigma_7)(1-\sigma_8)}, \text{ де } \sigma_8 = \sum_{i=1}^8 \rho_i;$$

$$W_9 = \frac{W_0}{(1-\sigma_8)(1-\sigma_9)}, \text{ де } \sigma_9 = \sum_{i=1}^9 \rho_i;$$

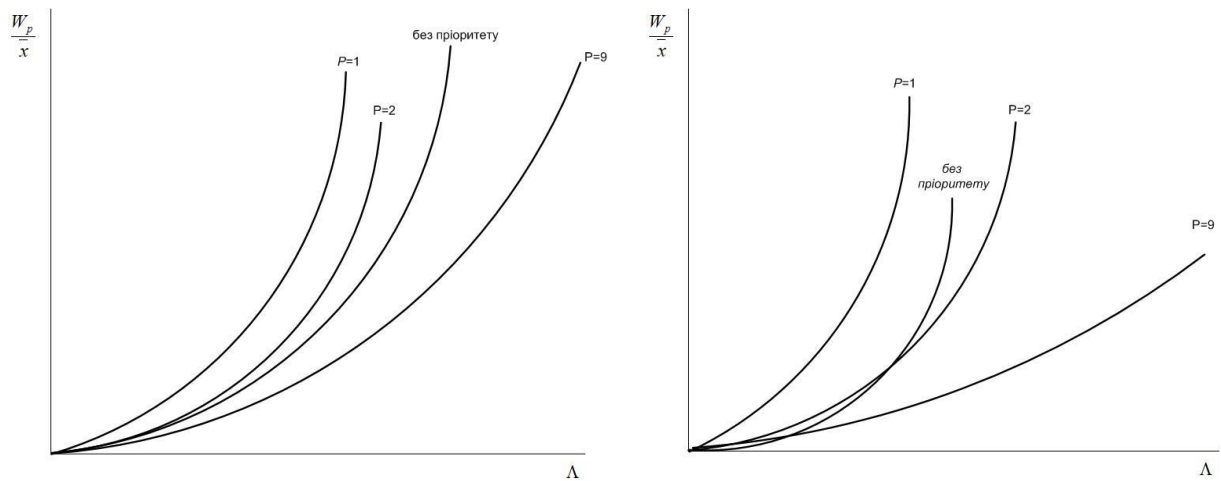


Рисунок 2.14. Залежність часу очікування в черзі для СМО мережі 5G:

$$P = 9, \lambda_p = \frac{\Lambda}{9}, \bar{x}_p = \bar{x}, a) \rho < 1, б) \rho > 1$$

На рис.2.14 показано, як змінюється нормована величина часу очікування в черзі для СМО мережі 5G з 9-ю пріоритетними класами з однаковими інтенсивностями потоків вимог кожного пріоритетного класу та рівним середнім часом обслуговування запитів кожного класу.

2.4. Математична модель обслуговування агрегованого трафіку

Для СМО мережі 5G с неоднорідним потоком запитів, в яку поступають 9 класів запитів, у т.ч. від мережі IoT, з інтенсивностями $\lambda_1, \dots, \lambda_9$ та середніми тривалостями обслуговування b_1, \dots, b_9 , визначаються дві групи характеристик обслуговування запитів:

1. характеристики за кожним класом (поток) запитів;
2. характеристики агрегованого (сумарного) потоку запитів.

Характеристики по кожному класу заявок $i, i = \overline{1,9}$:

- навантаження, яке створюється запитами класу i :

$$y_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} = \lambda_i b_i; \quad (2.26)$$

- імовірність втрати запитів:

$$\pi_{\sigma_i} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{N_{\sigma}(T)}{N(T)}, \quad (2.27)$$

де T - час функціонування системи,

$N(T)$ - кількість запитів поступило в систему за час T ,

$N_{\sigma}(T)$ - кількість втрачених запитів за час T ;

- імовірність обслуговування запитів:

$$\pi_{o_i} = (1 - \pi_{\sigma_i}); \quad (2.28)$$

- інтенсивність потоку обслугованих запитів (продуктивність за i -м класом запитів):

$$\lambda_{o_i} = \pi_{o_i} \cdot \lambda_i = (1 - \pi_{\sigma_i}) \cdot \lambda_i; \quad (2.29)$$

- інтенсивність потоку втрачених запитів:

$$\lambda_{\sigma_i} = \pi_{\sigma_i} \cdot \lambda_i; \quad (2.30)$$

- завантаження системи, яка створюється запитами класу i :

$$\rho_i = \min((1 - \pi_{\sigma_i}) \cdot y_i; 1), \quad (2.31)$$

де π_{σ_i} - імовірність втрати запитів класу i від обмеженої ємності накопичувача;

- час очікування запитів у черзі: w_i ;

- час затримання запитів в системі:

$$u_i = w_i + b_i; \quad (2.32)$$

- довжина черзі запитів:

$$l_i = \lambda_i \cdot w_i; \quad (2.33)$$

- кількість запитів в системі (в черзі та на обслуговуванні):

$$m_i = \lambda_i \cdot u_i. \quad (2.34)$$

Характеристики агрегованого потоку запитів дозволяють визначити усереднені для всіх класів запитів показники ефективності функціонування СМО:

- загальна інтенсивність надходження запитів в систему (інтенсивність загального потоку):

$$\Lambda = \sum_{i=1}^9 \lambda_i ; \quad (2.35)$$

- сумарне навантаження:

$$Y = \sum_{i=1}^9 y_i ; \quad (2.36)$$

- сумарне завантаження:

$$R = \min\left(\sum_{i=1}^9 \rho_i; 1\right), \quad (2.37)$$

де умова відсутності перевантажень в СМО має вигляд:

$$R < 1 ; \quad (2.38)$$

- коефіцієнт простоїю системи:

$$\eta = 1 - R ; \quad (2.39)$$

- середній час очікування агрегованого потоку в системі:

$$W = \sum_{i=1}^9 \xi_i \cdot w_i , \quad (2.40)$$

де ξ_i - частина запитів класу i в агрегованому потоці:

$$\xi_i = \frac{\lambda_i}{\Lambda} ; \quad (2.41)$$

- середній час затримання агрегованого потоку в системі:

$$U = \sum_{i=1}^9 \xi_i \cdot u_i , \quad (2.42)$$

- сумарна довжина черги агрегованого потоку в системі:

$$L = \sum_{i=1}^9 l_i ; \quad (2.43)$$

- сумарна кількість запитів агрегованого потоку в системі:

$$M = \sum_{i=1}^9 m_i ; \quad (2.44)$$

- сумарна час обслуговування будь-якого запиту агрегованого потоку в системі:

$$B = \sum_{i=1}^9 \xi_i \cdot b_i . \quad (2.45)$$

2.5. Висновки за розділом 2

1. Гарантування якості обслуговування з кінця в кінець є складним завданням для операторів мобільного зв'язку, оскільки вихід пакетних даних за межі рівня 5G ядра мережі (5GC) у рівень зовнішніх IP-орієнтованих мереж, наприклад, у рівень WLAN, не забезпечує жодних гарантій щодо якості обслуговування цієї мережі.

2. Концептуальна модель взаємодії мережі стандарту 5G з мережею IoT складається з вхідного і вихідного кластерів IoT та транспортної мережі (рис.2.1). В якості транспортної мережі виступає мережа стандарту 5G, яка обробляє звичний для неї потік P2P («peer-to-peer», «person-to-person», від людини до людини, від рівного до рівного), а також і потік пристроїв IoT.

3. Якість обслуговування в мережі стандарту 5G з мережею IoT можливо забезпечити як адаптивним управлінням шляхом зміни політики обробки інформації в мережі стандарту 5G, так і зміною структури G самій мережі IoT.

4. Результатом адаптації будуть найкращі (оптимальні у цих умовах) показники якості обслуговування запитів мережі IoT в мережі стандарту 5G. При цьому адаптацію (U^k) слід здійснювати на основі застосування принципів декомпозиції (окрема мережа IoT, окрема транспортна мережа), потім - системності (оцінювання якості обслуговування з кінця в кінець) та ітерації.

5. СМО мережі IoT слід будувати з рівня роутера (коммутатора, концентратора, основного контролера). Пакетний запит може утворюватися як на вхідних портах, так і на вихідних портах.

6. Мережу IoT можливо представити як СМО з пуасонівським потоком запитів на обслуговування та з дисципліною обслуговування черги типу FIFO.

7. Параметри якості обслуговування всередині мережі IoT не відповідають параметрам якості обслуговування мережі 5G, тому що ці дві множини

параметрів не перетинаються.

8. Вперше наданий алгоритм адаптації параметрів мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей, який передбачає розрахунок скінченної множини альтернативних варіантів структури мережі, що дозволяє особі, яка приймає рішення, приймати найкращі альтернативні варіанти структури мережі IoT за критерієм якості обслуговування в мережі 5G.

9. Вперше розроблена концептуальна модель мережі стандарту 5G з наданням сервісів Інтернету речей, яка враховує особливості пристроїв IoT щодо автономного зв'язку між великою кількістю розумних пристроїв, які одночасно надсилають невеликі пакети даних та використовуючи широкий спектр програм, що вимагає інфраструктури, різної з точки зору розміру пакетів, щільності трафіку та якості обслуговування.

10. Вдосконалена математична модель взаємодії мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей, яка розглядає мережу IoT як систему масового обслуговування, що дозволяє визначати стаціонарний розподіл ймовірностей станів системи, яка складається з пристроїв IoT та комутатору мережі стандарту 5G.

11. Вдосконалена математична модель забезпечення якості обслуговування в мережі Інтернету речей, яка враховує послідовність обслуговування запитів IoT в мережі 5G, що дозволяє розраховувати параметри якості обслуговування запитів в мережі Інтернету речей.

12. Вдосконалена математична модель обслуговування агрегованого трафіку в мережі 5G, яка враховує характеристики по кожному з дев'яти класів запитів по пріоритетах, що дозволяє визначити усереднені для всіх класів запитів показники ефективності функціонування мережі 5G.

Основні наукові та практичні результати розділу опубліковані в роботах [1,34,184,188,191,192,196,197,198,199,200].

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ СТРУКТУРНОЇ АДАПТАЦІЇ МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ НА ПРИКЛАДІ РОЮ БПЛА

За останні два десятиліття в результаті стрімкого технічного прогресу в галузі комунікаційних і мережевих технологій з'явилася унікальна можливість використовувати безпілотні літальні апарати (БПЛА) практично у всіх сферах життя суспільства. Спочатку БПЛА призначалися для військових цілей, але активно стали впроваджуватися в цивільну сферу застосування. Ці невеликі пристрої, оснащені різними датчиками і засобами зв'язку, знаходять активне застосування в правоохоронних органах, дорожньому і сільськогосподарському господарстві, будівництві, засобах масової інформації та ін. У літературі такі пристрої класифікуються як літаючі сенсорні мережі і позначаються як FUSN (Flying Ubiquitous Sensor Network). Вони являють собою клас бездротових (WSN) або всепроникних сенсорних мереж (USN). Технологія цих мереж заснована на самоорганізації безлічі різних датчиків з низьким енергоспоживанням в мережі і їх розміщенні у важкодоступних місцях. Передача даних здійснюється по протоколах ZigBee, Bluetooth, 6LoWPAN. Подальший розвиток і вдосконалення цієї ідеї, яка знайшла широке застосування в системах передачі інформації, привели до появи нового типу мереж зв'язку, який отримав назву «Мережа Ad-Нос» або «цільова мережа». Особливістю даної мережі є динамічність, що не має постійної структури топології, що складається з автономно діючих вузлів, які можуть зв'язуватися з сусідніми вузлами і можуть бути об'єднані в самоорганізовану мережу. У разі виходу з ладу одного або декількох вузлів інші вузли зможуть встановити нові маршрути для коректної передачі даних. Мережі Ad-Нос також почали активно впроваджуватися у всі сфери життя суспільства і розділилися на кілька типів: мобільні цільові мережі (MANET, Mobile Ad-Нос Network), автомобільні цільові мережі (VANET) і літакові цільові мережі (FANET).

Мобільні цільові мережі - це самоорганізовані однорангові бездротові мережі з непостійною топологією і відсутністю чітко визначеної інфраструктури, призначені для взаємозв'язку між вузлами мобільного зв'язку. У мобільній мережі кожен вузол може рухатися за будь-якою траєкторією, і всі ці зміни топології необхідно передавати на інші вузли та зберігати там для підтримки правильної маршрутизації передачі даних між ними. Учасниками мережі MANET можна вважати всі різні мобільні пристрої та гаджети, які можуть розташовуватися на наземному, повітряному і водному транспорті. Така мережа може бути розгорнута в місцях, де створення інфраструктури неефективно або неможливо.

Автомобільні цільові мережі VANET є типом бездротових сенсорних мереж і призначені для забезпечення та підтримки безпеки дорожнього руху, дозволяючи транспортним засобам обмінюватися даними один з одним за допомогою зв'язку V2V (Vehicle-to-Vehicle) або шляхом підключення до сусідньої фіксованої інфраструктури V2I (Vehicle-to-Infrastructure). Основними цілями використання мереж VANET є:

- 1) допомога водіям (навігація, запобігання аваріям);
- 2) оповіщення (про ремонтні роботи, щодо постів поліції, про зниження швидкості);
- 3) попередження (про стан дороги або перешкоди на ній).

Літакові цільові мережі FANET також самоорганізуються і призначені для взаємодії з мережами загального користування за допомогою невеликих БПЛА та/або БПЛА спеціального призначення. Цільова мережа FANET має розподілену бездротову структуру, що дозволяє здійснювати зв'язок між вузлами без будь-якої інфраструктури. У такій мережі БПЛА не взаємодіють між собою, а тільки з наземною станцією. Зі збільшенням кількості безпілотних пристроїв, що використовуються в одній мережі, проектування ефективної архітектури мережі стає серйозною проблемою, а також доводиться стикатися з обмеженням дальності зв'язку між БПЛА і наземною станцією. Одним із способів вирішення проблеми малої дальності може стати

організація каналів зв'язку між безпілотними літальними апаратами через ретранслятор або безпосередньо з другом. У той час як деякі БПЛА будуть зв'язуватися з наземною станцією або супутником, інші БПЛА зможуть отримувати дані без прямого зв'язку з наземною станцією, але за допомогою зв'язку з сусідніми пристроями. Такі мережі називаються «літаючими сенсорними мережами» (ЛСМ) (FUSN, Flying Ubiquitous Sensor Network). У літаючої сенсорної мережі взаємодія здійснюється на основі протоколів бездротових сенсорних мереж ZigBee, 6LoWPAN, Thread, RPL і протоколів малопотужних мереж сімейства LPWAN. ЛСМ може входити до складу мобільної системи зв'язку та надавати нові послуги як користувачам системи зв'язку загального користування, так і пристроям літаючих мереж в міжмашинному взаємодії M2M в рамках реалізації концепції Інтернету речей, а також мереж зв'язку п'ятого покоління.

3.1. Типова структура літакової сенсорної мережі

Така система складається з двох взаємодіючих сегментів: літакового і наземного.

Літаковий сегмент - це один або кілька БПЛА. У випадку з декількома БПЛА така споруда називається роєм (схожим на рій бджіл). Кожен пристрій літакового сегменту відповідає за прийом, зберігання і передачу інформації між вузлами наземного сегменту, а також дозволяє їм підключатися до ЛСМ. Сам БПЛА може бути реалізований на базі різних літаючих платформ:

- літакового типу: літаки, планери, літаючі крила тощо;
- гвинтокрилого типу: вертольоти і мультикоптери (літаки з чотирма і більше роторами з роторами).

У ролі наземного сегмента мережі використовуються сенсорні вузли (датчики, кінцеві пристрої), які встановлені на землі (рис.3.1) та за безпроводною технологією мають можливість зв'язку як між елементами наземного сегменту, так і з елементами літакового. Найчастіше – це пристрої

IoT, тому в подальшому елементи наземного сегменту будуть зображені як IoT.

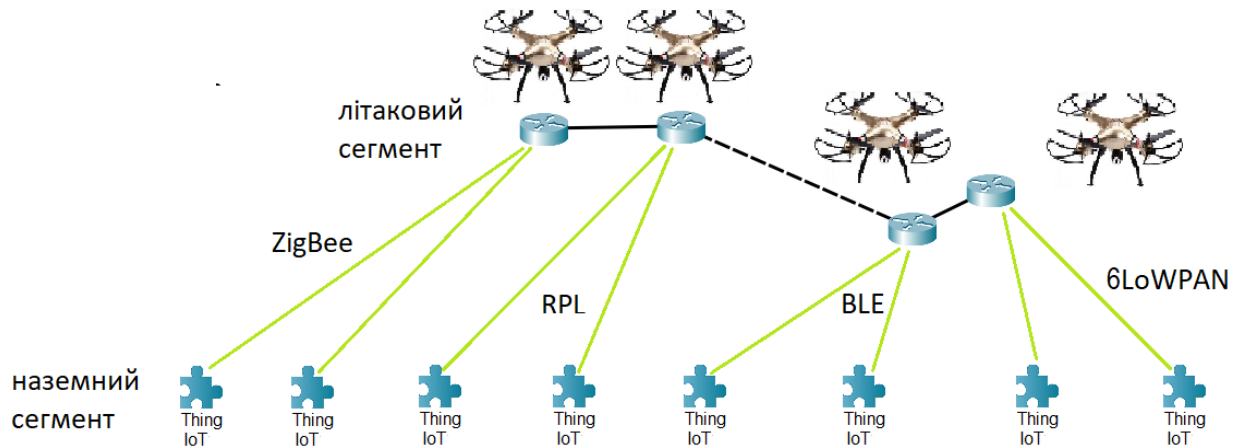


Рисунок 3.1. Архітектурне зображення літаючих сенсорних мереж

Ці вузли збирають інформацію і при необхідності управляють віддаленим об'єктом, працюють в автономному режимі, мають невеликі розміри і можуть тривалий час перебувати в сплячому режимі. Вони можуть збирати дані про вологість, температуру, шум, тиск, освітленість і т.д. Сенсорні вузли утворюють поля датчиків (сенсорні поля), які надають можливість відстежувати різні фізичні процеси всіма датчиками одночасно. Вся інформація БПЛА-маршрутизатор може передаватися як одним вузлом, так і групою датчиків, яка об'єднана в мережу за стандартом, наприклад, IEEE 802.11s, що входить до стандартів IEEE 802.11 і дозволяє організувати бездротові ієрархічні мережі Ad-Нос. Сенсорні поля можуть передавати дані до БПЛА-маршрутизатора через RFID-мітки на відстань до 300 м. Зв'язок між двома сегментами ЛСМ може також підтримуватися протоколами ZigBee, 6LoWPAN, Thread, RPL, BLE і т.і. Слід зазначити, що літакові вузли також повинні бути об'єднані в групи для розподілу і збору інформації з сенсорних полів, щоб в разі виходу з ладу одного з БПЛА цілісність мережі не порушувалася, а зібрані дані не губилися. Літакові вузли повинні літати по

заздалегідь запрограмованому маршруту і передавати отриману від датчиків інформацію на базову станцію або сервер зберігання і обробки даних через мобільні мережі за протоколами GPRS, 3G, LTE, 5G або з використанням сучасних протоколів стандарту IEEE 802.15.4: ZigBee 6LoWPAN, Thread, RPL (рис. 3.2).

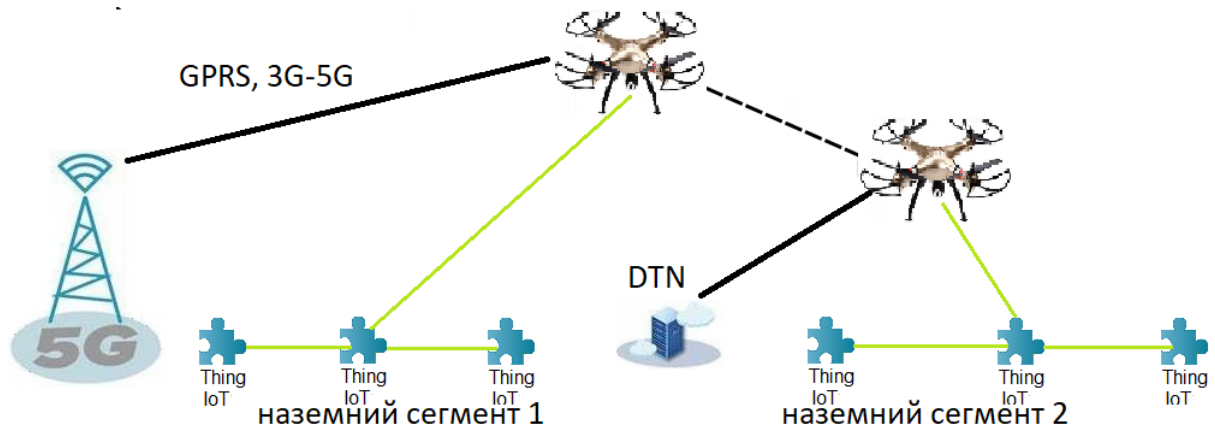


Рисунок 3.2. Схема передачі інформації в літаючих сенсорних мережах

3.2. Архітектура літакових цільових мереж

Як вже зазначалося раніше, літакові сенсорні мережі є різновидом бездротових сенсорних мереж, тому архітектурно їх можна розділити на однорангові та ієрархічні (кластерні) мережі. З огляду на те, що FANET складається з двох сегментів (літакового і наземного), кожен з них може бути представлений обома архітектурами. Однорангові мережі - це ті мережі, які можуть мимовільно утворювати нову мережеву структуру за рахунок самоорганізації вузлів, що дає можливість забезпечити цілісність мережі в разі втрати вузла. Однорангова мережа має сітчасту структуру. Всі вузли цієї мережі ідентичні за своєю функціональністю, але необхідно вибрати один центральний вузол, який буде приймати, обробляти всі дані і передавати їх для обробки далі. На рис. 3.3 пристрій IoT5 є центральним вузлом «зірки» з елементами IoT0-IoT4.

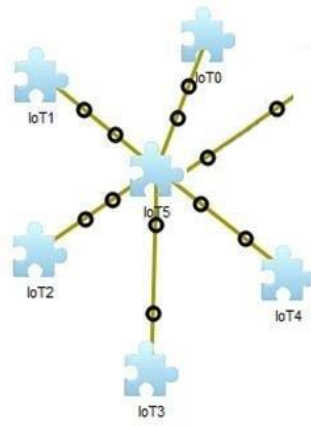


Рисунок 3.3. Однорангова мережева структура

Ієрархічною мережею називають мережу, яка розділена на кластери. Кожен кластер має маршрутизатор, що виконує роль головного вузла, і датчики, які є просто елементами мережі (рис. 3.4). Маршрутизатор збирає, обробляє і передає інформацію, зібрану з усіх датчиків в кластері, за безпроводною технологією.

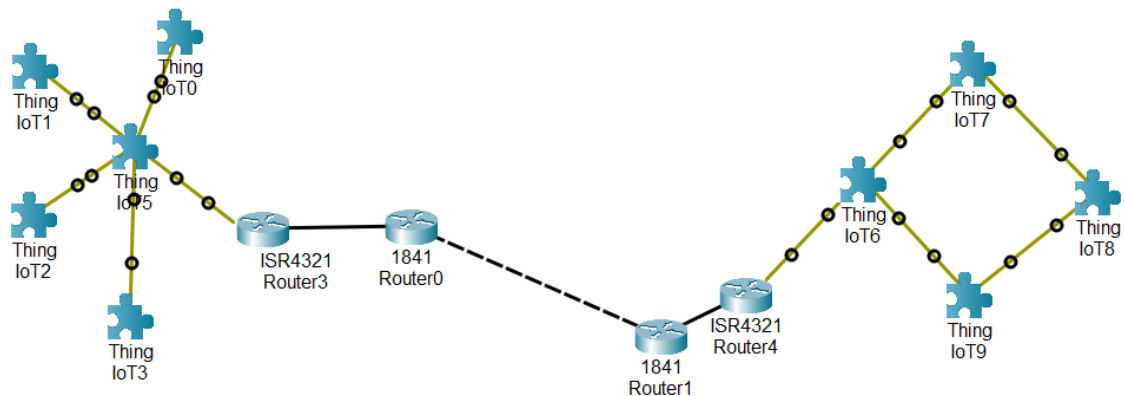


Рисунок 3.4. Структура ієрархической сети

Маршрутизатор ЛСМ є літакового типу з автономною системою електроживлення, тому може швидко вийти з ладу через недостатню потужність блоку електроживлення. На рис.3.4 зображені два кластери, головними елементами яких є пристрої IoT5 та IoT6. Кожен з кластерів має

зв'язок з маршрутизатором (Router3 та Router4), які мають зв'язки з іншими маршрутизаторами та можуть забезпечити обмін даними між собою.

3.3. Типи вузлів бездротової сенсорної мережі

Архітектура бездротової сенсорної мережі складається з трьох типів вузлів:

1. Координатор є обов'язковим і єдиним пристроєм в мережі. Він визначає маршрути передачі інформації, задає параметри мережі, управляє пристроями, підключеними до мережі, вибирає необхідні частотні канали, а також грає роль шлюзу для забезпечення доступу до зовнішньої мережі. Залежно від програми він може виконувати різні додаткові функції, наприклад, це може бути хаб або мережевий менеджер, який стежить за рівнем перешкод на обраному каналі і може переносити обмін інформацією всій мережі в інший діапазон радіочастот.

2. Маршрутизатор - пристрій, що відповідає за прийом, зберігання і передачу інформації між вузлами. Дозволяє цільовим пристроям підключатися до мережі і відправляти їм пакети з параметрами від координатора. Якщо в складі літакового сегменту є тільки один БПЛА, то він виконує роль як маршрутизатора, так і координатора.

3. Сенсорний вузол (кінцевий пристрій, цільовий вузол) - датчик, який збирає дані, такі як температура, вологість, показники запиленості, рівня електромагнітного поля і т.д. Сенсорний вузол може управляти віддаленим об'єктом, якщо це необхідно. Сенсорний вузол має бути невеликим, з низьким енергоспоживанням, здатним довго перебувати в сплячому режимі. Разом сенсорні вузли утворюють сенсорне поле, яке є місцем, площадкою, територією моніторингу.

3.4. Мережеві топології бездротової сенсорної мережі

Однорангові мережі можуть бути представлені у вигляді топології типу «від зірки до точки» (рис.3.5б) або «точка-точка» (рис.3.5ба), а коли використовується топологію типу «hub-and-spoke», встановлюється зв'язок між цільовими вузлами (одним або багатьма) і координатором (маршрутизатором). У топології «точка-точка» кожен пристрій може зв'язуватися з будь-яким іншим в межах ЛСМ. На рис.3.5а пристрій IoT1 зв'язаний з пристроєм IoT11. На рис.3.5аб пристрій IoT5 зв'язаний з пристроями IoT0-IoT4 одночасно.

Ієрархічною називається мережа, яка реалізується у вигляді кластерного дерева (рис.3.5в), де цільові пристрої підключаються до вузла, який виконує роль маршрутизатора, який в свою чергу має також зв'язання з координатором. Координатор може мати зв'язок з декількома кластерними групами. На рис.3.5в пристрій IoT7 виконує роль маршрутизатора, який зв'язує 2 кластера (IoT5 та IoT9). Роль координатора виконує IoT0.

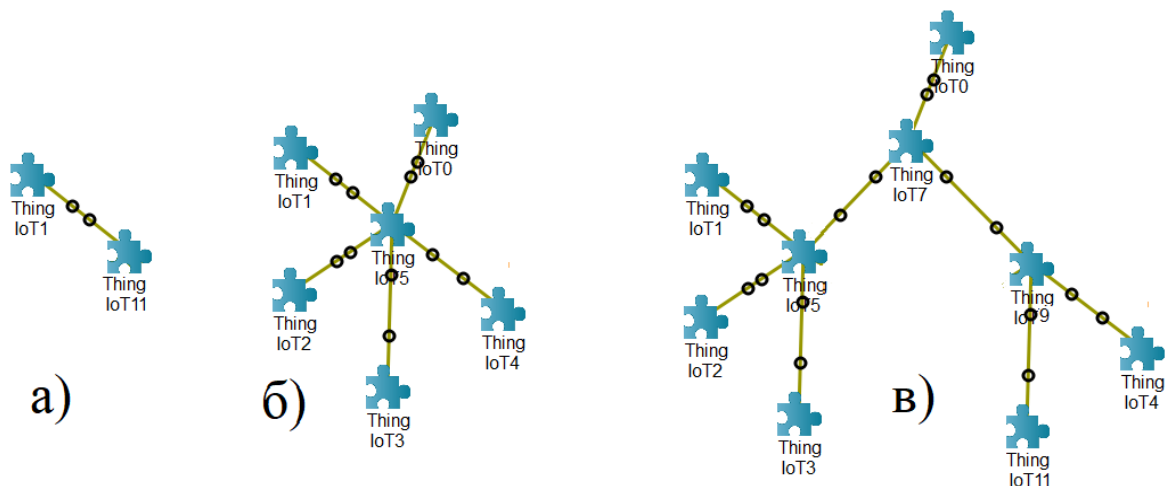


Рисунок 3.5. Топології сенсорних мереж: а – «точка-точка», б – «зірка», в – кластерне дерево

3.5. Теоретичні та практичні напрямки досліджень в області літаючих сенсорних мереж

Стаття [33] присвячена дослідженню параметрів радіосигналів при використанні БПЛА в мережі AWSN (від англійського aerial wireless sensor networks). Робота передбачає, що AWSN включає в себе кілька БПЛА; БПЛА оснащений малопотужним приймачем стандарту ZigBee, який відрізняється низькою швидкістю передачі і енергоспоживанням пристроїв. Результати дослідження поділяються на дві частини. Спочатку представлені результати дослідження впливу на якість зв'язку таких факторів, як навколишнє середовище, напрямок приймально-передавальних антен, ефект багатопроменевого згасання внаслідок відбиття від земної поверхні і т.і., а також їх взаємний вплив. По-друге, в роботі пропонуються шляхи зменшення впливу перерахованих вище джерел перешкод. Ключовим завданням дослідження стало питання ефективного енергоспоживання вузлів мережі (БПЛА, мобільних вузлів) при використанні двох БПЛА як точок доступу бездротової мережі (в рамках завдання передбачається, що БПЛА належать різним операторам зв'язку). В якості способу зниження енергетичних витрат в статті пропонується визначити оптимальну частоту передачі маяків БПЛА в мережі з метою пошуку наземних мобільних користувачів. Для вирішення цього завдання автори статті використовують теорію ігор (а саме кооперативні ігри) і концепцію рівноваги Неша (набір стратегій в грі з двома і більше гравцями, при якому зміна стратегії одного гравця не може привести до збільшення його виграшу, якщо інші гравці також не змінять свої стратегії).

В інших роботах [41, 52, 86] розглядаються неієрархічні структури літаючих сенсорних мереж з одним або кількома БПЛА. В останні роки в рамках робіт із забезпечення зв'язку у важкодоступних районах або у військових цілях було запропоновано використовувати нове покоління висотних телекомунікаційних платформ (High Altitude Platform, HAP), а саме прив'язні аеростатні кулі, з'єднані з наземною інфраструктурою високошвидкісним кабелем (каналом), або з наземною інфраструктурою

мають зв'язок спеціальні літаки зв'язку та управління. Таке рішення дозволило забезпечити телефонний зв'язок, передачу даних, відеоспостереження за користувачами на досить великій території, але не здатне збирати інформацію з полів датчиків, розташованих на цій території. З огляду на обмежений час перебування БПЛА в польоті, закономірно виникла проблема поділу всього наземного сегменту на окреми наземні сегменти, де само розміщення датчиків на місцевості має назву сенсорного поля. Так виникла ієрархічна структура ЛСМ, найпростіший варіант якої з двома рівнями ієрархії літакового сегмента та двома наземними сегментами ЛСМ зображений на рис.3.6. Ці структури в даний час практично не вивчені, але потрібно хоча б забезпечити раціональний вибір кількості рівнів ієрархії і дати чисельні оцінки кількості БПЛА на кожному з них.

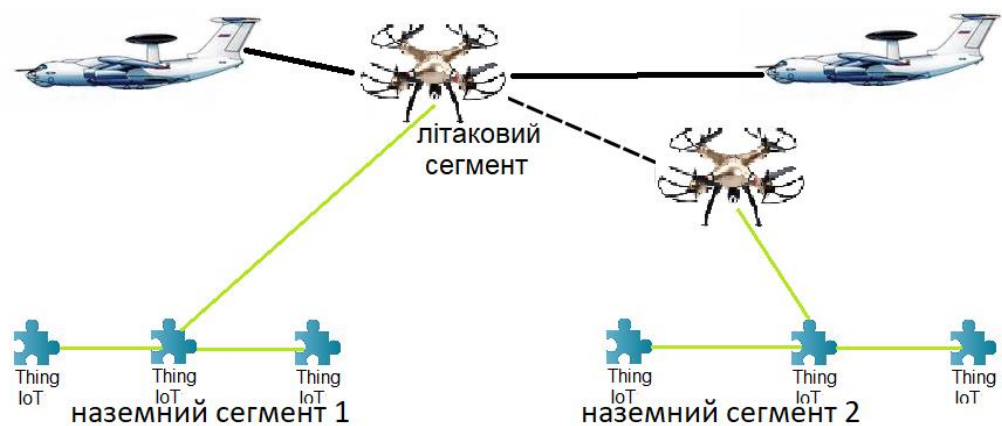


Рисунок 3.6. Ієрархічна ЛСМ

ЛСМ і системи масового обслуговування. Представлення БПЛА як буферної системи масового обслуговування в мережі, яка толерантна до затримки (DTN), принципово вирішило питання використання сучасних досягнень теорії телетрафіку [89] для розрахунку характеристик ЛСМ і параметрів якості обслуговування. Однак наявність безлічі БПЛА для вирішення завдань ЛСМ і багатьох сенсорних полів в мережах, стійких до затримок [94], вимагає проведення масштабних теоретичних досліджень в

цій області: кластеризація наземного і літаючого сегментів, завдання управління ЛСМ, представлення ЛСМ як системи масового обслуговування [209], представлення БПЛА як системи масового обслуговування, вибір раціонального маршруту збору інформації, розміщення сенсорних вузлів на сенсорних полях, заміни і / або підзарядки сенсорних вузлів наземної мережі з власною допомогою та ін.

Кластеризація наземного і літаючого сегментів. Оскільки сенсорні поля можуть складатися з дуже великої кількості сенсорних вузлів, кластеризація зазвичай використовується для організації функціонування бездротової сенсорної мережі. Існує безліч алгоритмів вибору головних вузлів для сенсорних полів [5, 23, 181], розташованих на площині, як для стаціонарних, так і для мобільних сенсорних вузлів. Проте робота в цьому напрямку триває, і поява нових алгоритмів наземних сенсорних полів дозволяє поліпшити характеристики ЛСМ. Алгоритмів вибору головного вузла для сенсорних мереж в тривимірному просторі не так вже й багато. З огляду на складність збору інформації за допомогою БПЛА в тривимірному просторі ідея про те, щоб кластери були однакового розміру, видається продуктивною, що могло б полегшити збір даних. БПЛА, які в основному будуть використовуватися для створення найближчого, а в деяких випадках і єдиного до поверхні землі літакового фрагменту, мають дуже обмежені можливості в плані тривалості перебування в польоті. Тому вибір раціонального маршруту збору інформації представляється завданням першорядної важливості. Перші результати показують, що для вирішення такого завдання доцільно використовувати методи вирішення задачі комівояжера, що, звичайно ж, пов'язано зі значним обсягом розрахунків.

Завдання управління ЛСМ. Потенційно велика кількість обчислень для обмежених в енергоресурсах земних та літакових сенсорних полів говорить про необхідність звернутися до досягнень програмно-визначених мереж SDN (Software Defined Networks) для раціонального розподілу функцій між рівнями в ієрархічній ЛСМ [144]. Дійсно, функції тимчасового головного

вузла для кластерів можуть виконувати БПЛА, а складні розрахунки можуть проводитися, наприклад, на висотних телекомунікаційних платформах НАР при вирішенні так званої задачі розміщення контролера завдання розміщення (Controller Placement Problem, CPP) мережі SDN. Крім того, є можливість успадкувати інструментарій системи управління безпекою SDN для ЛСМ.

3.6. Літакова сенсорна мережа як система масового обслуговування

Розвиток безпілотних літальних апаратів та інфраструктури розумних міст ставить перед собою багато нових теоретичних і практичних завдань. Одним з них є побудова всепроникної сенсорної мережі як мережі, толерантної до затримок, з використанням безпілотних літальних апаратів як засобу доставки даних. Дане завдання передбачає організацію взаємодії вузлів безпроводної сенсорної мережі (БСМ) з засобами зв'язку БПЛА з урахуванням особливостей їх переміщення. Вузли БСМ якимось чином, в загальному випадку випадковим чином, розподіляються по обслуговуваній площі. Припустимо, що кластеризації наземної мережі немає, і БПЛА рухається по якійсь заздалегідь заданій траєкторії. Тоді головний показник якості функціонування такої мережі, тобто час збору і доставки даних, буде залежати від швидкості літака. Вибір швидкості обмежений як технічними характеристиками самого літака, так і імовірно-часовими характеристиками процесу обміну даними (повідомленнями) між засобами зв'язку БПЛА і вузлами БСМ. Можна припустити різні варіанти руху БПЛА при виконанні завдання збору даних: рух з постійною швидкістю і рух зі змінною швидкістю в залежності від характеру розподілу вузлів мережі. Другий варіант є більш загальним і може передбачати різні вимоги до взаємодії з мережевими вузлами. Ці вимоги також можуть бути різними і в цілому можуть визначатися ймовірністю зчитування даних з мережевого вузла. Нижче буде розглянута особливість збору даних з сенсорної мережі

одним БПЛА і роєм БПЛА.

3.7. Безпілотний літальний апарат як система масового обслуговування

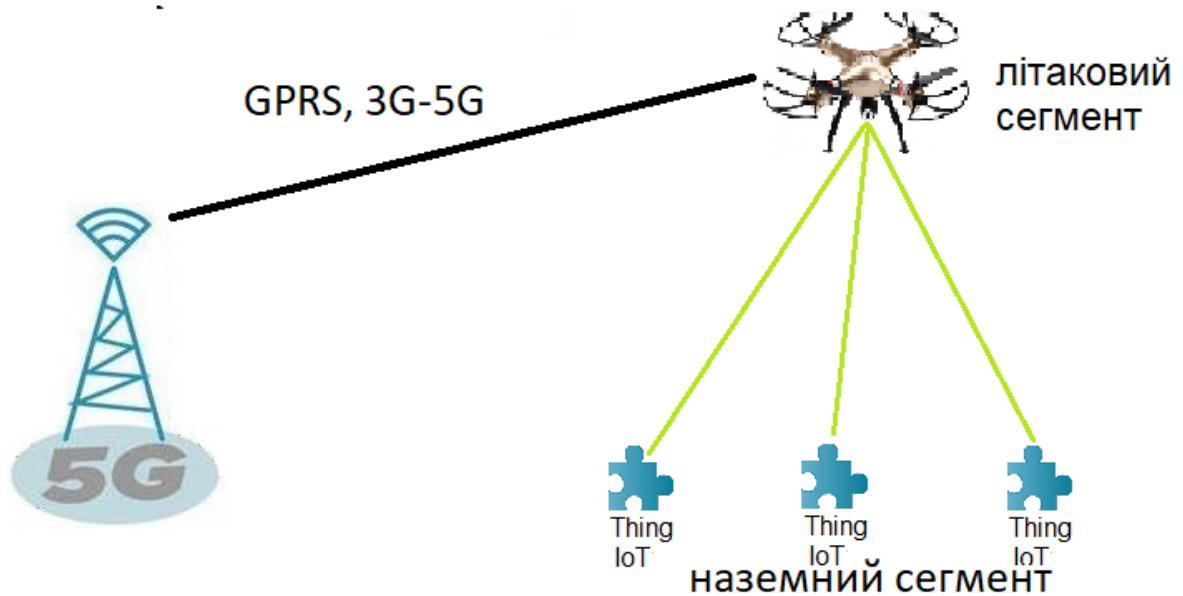


Рисунок 3.7. Доставка даних з вузлів сенсорної мережі в систему зв'язку загального користування

Припустимо, маршрутизатор мережі ЛСМ розташований на БПЛА, який пролітає со швидкістю V над сенсорним полем (наземна бездротова сенсорна мережа) і збирають дані з наземних сенсорних вузлів (рис. 3.7). БПЛА за час взаємодії з одним сенсорним вузлом переміщується на відстань l , яка незначна в порівнянні з радіусом зони обслуговування r :

$$l = V \cdot \tau_0$$

$$\frac{l}{r} \rightarrow 0, \quad (3.1)$$

де τ_0 — час взаємодії з одним сенсорних вузлом;

V — швидкість БПЛА.

З кінцевим r ця умова справедлива для всіх вузлів мережі, які знаходяться в зоні обслуговування, тільки тоді, коли $V \rightarrow 0$ або $\tau_0 \rightarrow 0$, тобто

коли БПЛА знаходиться в нерухомому стані в точці збору даних або зчитування даних здійснюються миттєво. Якщо $V > 0$ або $\tau_0 > 0$, то у напрямі, який протилежний напрямку руху, будуть знаходитися вузли, які не будуть обслуговуватися. Виходячи з часу перебування вузла в зоні обслуговування, можна визначити межу зони, в якій вузол буде обслуговуватися на заданій швидкості БПЛА. Якщо мінімальний обслуговування час дорівнює τ_0 , то центр зони обслуговування зміститься на l . Площа, в якій вузол може обслуговуватися за час τ_0 , визначена на рис.3.8 як S_0 .

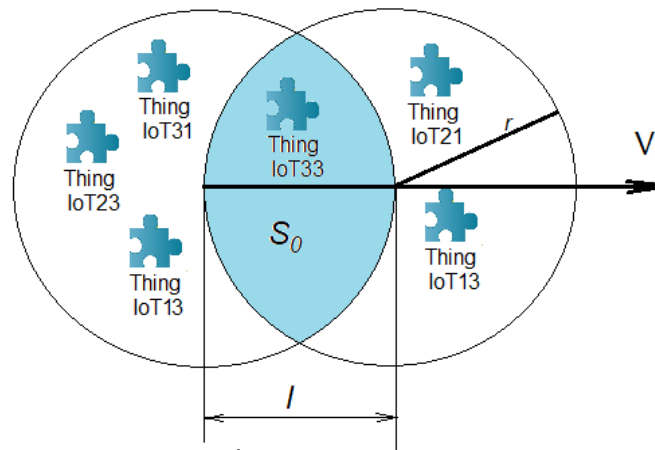


Рисунок 3.8. Площа зони обслуговування БПЛА під час руху

Таким чином, якщо в якийсь момент часу БПЛА, що рухається зі швидкістю V , повинен провести сеанс зв'язку тривалістю τ_0 , слід вибрати вузол із зазначеної ділянки S_0 . Вузол, що лежить зліва від даної ділянки, не зможе обслуговуватися, т.к. БПЛА вже здійснив політ, а вузол, що лежить справа від даної ділянки, не зможе обслуговуватися, т.к. БПЛА ще не літав.

Наведені вище міркування вірні при розгляді одного вузла. Якщо в зоні обслуговування БПЛА багато вузлів, то їх обслуговування зажадає більше, ніж τ_0 , часу, що вимагає окремого розгляду. При обслуговуванні декількох сенсорних вузлів БПЛА може розглядатися як система масового обслуговування (рис. 3.9), на вхід якої надходять запити від вузлів з зони

обслуговування, які можуть бути обслуговувані під час перебування БПЛА (П) в зоні обслуговування. Запити від вузлів з зони обслуговування, які не були обслуговані протягом цього часу, відхиляються. Інтенсивність потоку запитів λ_i від сенсорних вузлів i залежить від радіуса зони обслуговування, щільності вузлів і швидкості БПЛА. Для обслуговування одного вузла БПЛА потрібен деякий час τ_0 , на протязі якого вузол повинен знаходитися в зоні доступності.

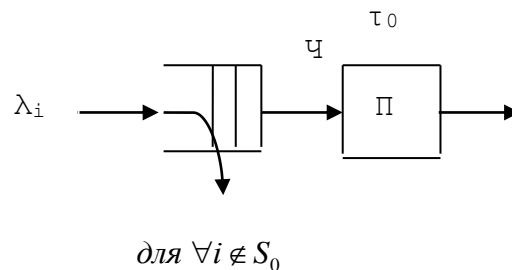


Рисунок 3.9. БПЛА як система масового обслуговування

Завдання з обслуговування одного БПЛА для багатьох сенсорних вузлів доцільно розглянути для двох типових випадків.

У першому випадку відомі координати сенсорних вузлів. У цьому випадку в систему надходить детермінований потік запитів. Оптимізація функціонування такої системи зводиться до вибору правила (графіка) обслуговування вузлів.

У другому випадку координати сенсорних вузлів не відомі. На вхід системи надходить випадковий потік запитів від них. Щоб вибрати режим роботи такої системи, необхідно визначити залежність ймовірності відмови в обслуговуванні запитів від її параметрів.

Рішення за відомими координатами вузла (детермінований потік запитів). Припустимо, в якийсь момент часу в зазначеній зоні зони обслуговування знаходиться кілька вузлів, то при швидкості руху V максимальна кількість вузлів, яке потенційно може обслуговуватися за часом

τ_0 , визначається часом переміщення БПЛА на відстань r :

$$k_{\max} = \frac{r}{V \cdot \tau_0} . \quad (3.2)$$

Однак це лише максимальна кількість обслугованих вузлів, яка може бути отримана тільки для вузлів, які розташовані за напрямком руху БПЛА та ще на відстані друг від друга $\Delta d > l$. Якщо в зоні обслуговування БПЛА одночасно знаходяться декілька сенсорних вузлів, то ще важливий і порядок їх обслуговування, поскільки деяка частина сенсорних вузлів покине зону обслуговування під час обслуговування іншого з вузлів. Таким чином, кількість обслугованих вузлів залежить від часу їх перебування в регіоні, тобто від їх положення і порядку обслуговування. Для вирішення завдання необхідно визначити таку послідовність обслуговування сенсорних вузлів, в якій обслуговувалося б їх максимальна кількість. Вирішити цю проблему можна, звівши її до завдання призначення. Для його вирішення потрібен час $O(n^3)$, що в реальній ситуації (для реальної кількості вузлів в зоні обслуговування) цілком прийнятно.

Рішення за невідомими координатами вузлів (випадковий потік запитів). З невідомими координатами сенсорних вузлів в систему надходить випадковий потік запитів від них. Властивості цього потоку визначаються розміщенням вузлів на сенсорному полі, радіусом зони обслуговування БПЛА і швидкістю його руху.

Зробимо наступні припущення:

- сенсорне поле - це поле Пуассона;
- припустимо, що БПЛА рухається по прямій з постійною швидкістю V ;
- зона обслуговування - це коло радіусом r .

Визначимо функцію розподілу для вхідного потоку запитів. Для цього розглянемо зону обслуговування БПЛА в момент 0 і в момент часу τ_0 . Протягом часу τ_0 система отримає ті запити від сенсорних вузлів, які знаходяться в області S_0 , наведеній на рисунку 3.8. За властивостями поля Пуассона ймовірність того, що в якійсь області є a точок (вузлів),

визначається розподілом Пуассона і залежить тільки від площі цієї області.

Імовірність того, що в області S_0 буде m запитів від сенсорних вузлів дорівнює

$$p_m = \frac{a^m}{m!} \cdot e^{-a}, \quad (3.3)$$

де $a = \rho \cdot S_0$ — кількість вузлів в зоні обслуговування;

ρ — щільність сенсорних вузлів на одиницю площі;

$S_0 = 2rV\tau_0$ — площа зони обслуговування.

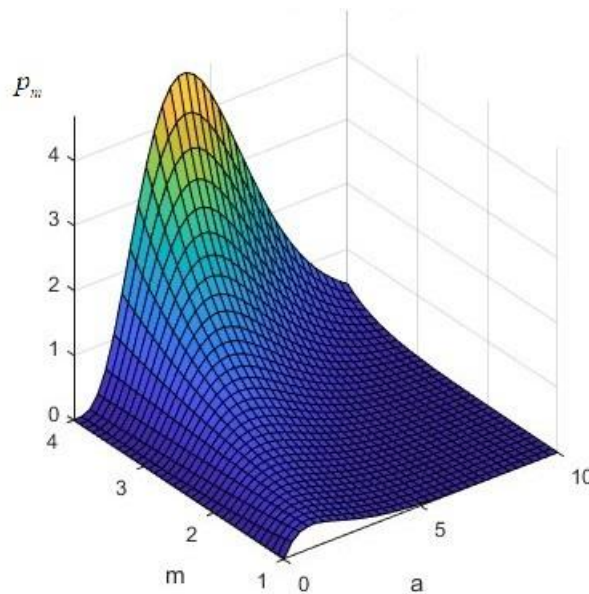


Рисунок 3.10. Функція розподілу кількості запитів ($r=10$ м, $V=10$ м/с)

Інтенсивність потоку, тобто середня кількість запитів від сенсорних вузлів за одиницю часу, тоді складе:

$$\lambda = 2rV\rho. \quad (3.4)$$

На рис.3.10 наведений графік залежності імовірності того, що в області S_0 буде m запитів від сенсорних вузлів, від кількості вузлів в зоні обслуговування при різних значеннях m . За графіком видно, що при збільшенні кількості вузлів в зоні обслуговування імовірність того, що всі вони будуть в зоні обслуговування, зменшується.

Розподіл часового проміжку між заявками. Для випадкової величини T

часового проміжку між двома сусідніми запитами її функція розподілу має вигляд

$$F(\tau_0) = P(T < \tau_0). \quad (3.5)$$

Тоді ймовірність того, що m запитів прийдуть за проміжок часу довжини τ_0 , дорівнює:

$$P(T \geq \tau_0) = 1 - F(\tau_0) = p_0(\tau_0) = e^{-2rV\rho\tau_0}, \quad (3.6)$$

а функція розподілу часового проміжку між запитами виглядає наступним чином (рис.3.11):

$$F(\tau_0) = 1 - e^{-2rV\rho\tau_0}. \quad (3.7)$$

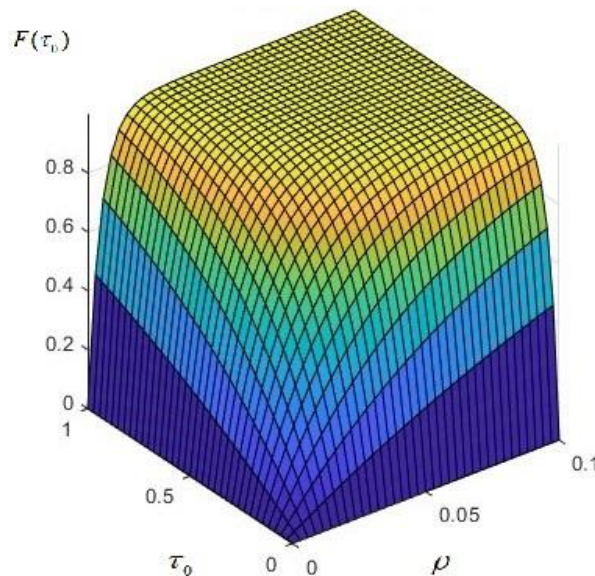


Рисунок 3.11. Функція розподілу часового проміжку між запитами від сенсорних вузлів

На рис.3.11 наведений графік функції розподілу часового проміжку між запитами від сенсорних вузлів при різних значеннях ρ . За графіком видно, що при збільшенні навантаження від вузлів в зоні обслуговування та при збільшенні часу обслуговування одного запиту, значення функції збільшується.

Диференціюючи (3.7), знайдемо щільність ймовірності часового проміжку між запитами від сенсорних вузлів (рис.3.12):

$$f(\tau_0) = 2rV\rho \cdot e^{-2rV\rho\tau_0}. \quad (3.8)$$

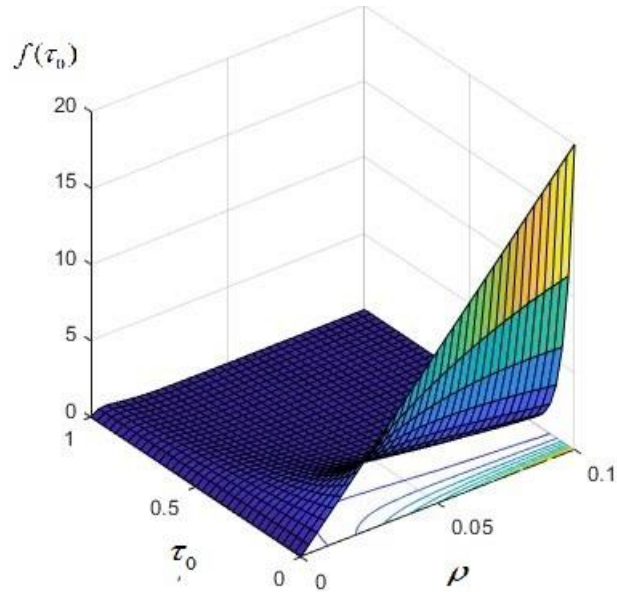


Рисунок 3.12. Щільність ймовірності часового проміжку між запитами від сенсорних вузлів

На рис.3.12 наведений графік функції щільності ймовірності часового проміжку між запитами від сенсорних вузлів при різних значеннях ρ . За графіком видно, що при збільшенні навантаження від вузлів в зоні обслуговування та при збільшенні часу обслуговування одного запиту, значення функції збільшується.

Таким чином, на вхід системи надходить найпростіший потік, тимчасові проміжки між запитами в якому розподіляються за експоненціальним законом із середнім значенням:

$$\bar{a} = \frac{1}{2rV\rho} \quad (3.9)$$

і дисперсією

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{4 \cdot (2rV\rho)^2}. \quad (3.10)$$

Якщо припустити, що час перебування вузла в зоні обслуговування не обмежена, для оцінки імовірності того, що вузол не буде обслуговуваний, можна використовувати відоме співвідношення:

$$p = \frac{1-\rho}{1-\rho^{\frac{2(n+1)}{C_a^2+C_b^2}}} \cdot \rho^{\frac{2n}{C_a^2+C_b^2}}. \quad (3.11)$$

де $\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \cdot \tau_0$ - коефіцієнт завантаження системи;

C_a - коефіцієнт варіації часового проміжку між порядками;

C_b — коефіцієнт зміни часу обслуговування;

n — кількість місць очікування в черзі.

При цьому випадку $C_a = 1$ і $C_b = 0$, з урахуванням цього:

$$p = \frac{1-\rho}{1-\rho^{2(n+1)}} \cdot \rho^{2n}. \quad (3.12)$$

На рис.3.13 показаний вплив завантаження системи ρ на імовірності того, що вузол не буде обслуговуваний. З рисунку видно, що при завантаженні системи до рівня 0,6 всі запити в зоні обслуговування будуть обслуговувани. При збільшенні кількості місць в черзі обслуговування кількість обслуговуваних вузлів буде збільшуватися і, відповідно, імовірності того, що вузол не буде обслуговуваний, буде зменшуватися.

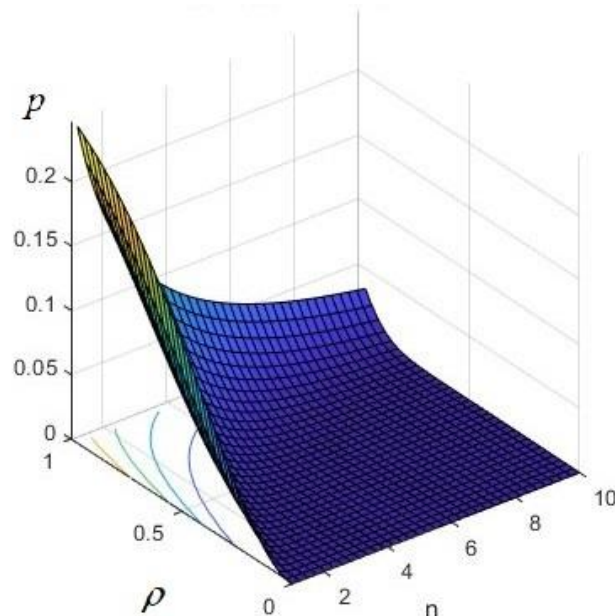


Рисунок 3.13. Вплив завантаження системи ρ на імовірності того, що вузол не буде обслуговуваний, при різній кількості місць очікування в черзі n

Наведені міркування показують, що в тому випадку, коли розташування вузлів сенсорної мережі може бути описано полем Пуассона, модель взаємодії БПЛА з БСМ може бути описана моделлю СМО з комбінованою дисципліною обслуговування (очікування і втрата), входом якої є найпростіший потік запитів. В цілому, при довільному характері розміщення вузлів, щоб описати якість обслуговування вузлів (ймовірність втрат), необхідно оцінити коефіцієнти варіації часових інтервалів між додатками (моменти, коли вузли потрапляють в зону покриття БПЛА) і часу обслуговування вузла. Припускаючи, що час обслуговування має експоненціальний розподіл, розглянуту модель можна записати як $M(\rho, R, \nu)/M/1$.

3.8. Ройові БПЛА як мережа масового обслуговування

При розгляді завдання збору даних з сенсорних вузлів, розташованих на великій площі, доцільно розглянути можливість використання групи або рою БПЛА (рис. 3.14). На цьому рисунку вузли безпроводної сенсорної мережі є джерелами даних, літаючі мережі Ad-Нос (приймально-передавальна апаратура знаходиться на БПЛА) - мережею доставки даних, а споживачі даних взаємодіють з літаковим сегментом через шлюз.

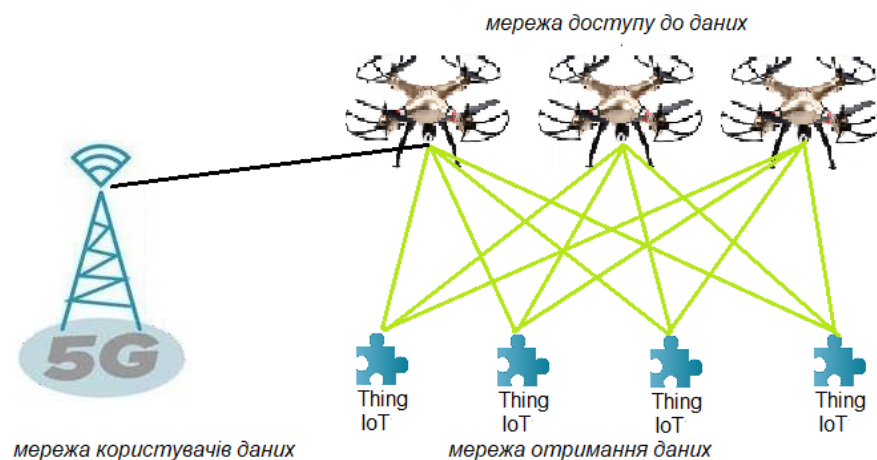


Рисунок 3.14. Використання рою БПЛА в ЛСМ

Розглянемо рій БПЛА як систему масового обслуговування, де рій

рухається із заданою швидкістю та час взаємодії з наземним сегментом прямо пропорційно залежить від швидкості руху цього рою.

З урахуванням наведеного, потік запитів від наземної сенсорної мережі, що надходять на БПЛА-маршрутизатор, має властивості найпростішого потоку додатків. У випадках, якщо сенсорне поле містить сотні і тисячі сенсорних вузлів (за технологією ZigBee можливо обслуговувати поля з кількістю вузлів до 64 000), то таке сенсорне поле не може бути описано моделлю поля Пуассона, потоки на входах маршрутизаторів також можуть відрізнятися від найпростіших потоків, більш того, вони мають властивості самоподібності, що буде зазначено нижче. Крім потоку запитів з конкретного сенсорного вузла, потоки трафіку з інших вузлів мережі також надходять на маршрутизатор.

Загалом, час обслуговування запитів на маршруті складається з двох основних компонентів: часу передачі запиту по каналу і часу очікування стану готовності каналу, які, як правило, випадкові. Зміна стану каналу - це випадковий процес, що протікає під впливом багатьох незалежних факторів (подій), наприклад, таких як вхід і вихід із зони зв'язку внаслідок випадкового відхилення від заданої траєкторії руху, вплив перешкод від передавальних пристроїв, розташованих на інших елементах системи і т.і. Слід очікувати, що при досить великій кількості таких незалежних заходів інтервали готовності каналу матимуть розподіл, близький до експоненціального розподілу, отже, затримка стану готовності також матиме аналогічний розподіл. Якщо розподіл часу передачі повідомлення по каналу зв'язку близький до експоненціального, то припущення про експоненціальний розподіл часу обслуговування цілком допустимо. Якщо вищевказані мережеві умови підкріплюються припущенням експоненціального часу обслуговування запитів у вузлах, описані умови будуть збігатися з умовами мережі Джексона.

Середній час доставки в такій мережі при наявності декілька каналів обслуговування можна оцінити як:

$$T = \sum_{j=1}^M \frac{\lambda_j}{\gamma} \cdot T_j, \quad (3.13)$$

де M — кількість каналів в мережі;

n — кількість вузлів мережі;

T_j — затримка на j -му каналі;

$\gamma = \sum_{i=1}^n \gamma_i$ — загальний трафік мережі зв'язку;

λ_j — загальний трафік обслуговується в j -му каналі,

$$T_j = \frac{1}{\mu_j - \lambda_j},$$

μ_j — інтенсивність обслуговування в j -му каналі.

Терміни доставки по конкретному мережевому маршруту можна оцінити, використовуючи властивості мережі Джексона. Відомо, що кожен з вузлів такої мережі можна розглядати як самостійну СМО типу М/М/1, а весь маршрут як послідовність незалежних СМО типу М/М/1 (рис.3.15), де запити від сенсорного вузла s з інтенсивністю γ_{s1} через маршрутизатори n_1 та n_2 передаються до сенсорного вузла d . Час обслуговування у маршрутизаторах \bar{t}_1 та \bar{t}_2 відповідно. Крім того, на маршрутизатори n_1 та n_2 потупають також запити від інших сенсорних вузлів з інтенсивністю γ_1 та γ_2 відповідно. В зв'язку з переміщенням маршрутизаторів частина сенсорних вузлів не буде обслугована, тому на кожному маршрутизаторі можливі відмови в обслуговуванні запитів. Результуючий потік на виходах маршрутизаторів n_1 та n_2 дорівнює γ_{12} та γ_{2d} відповідно.

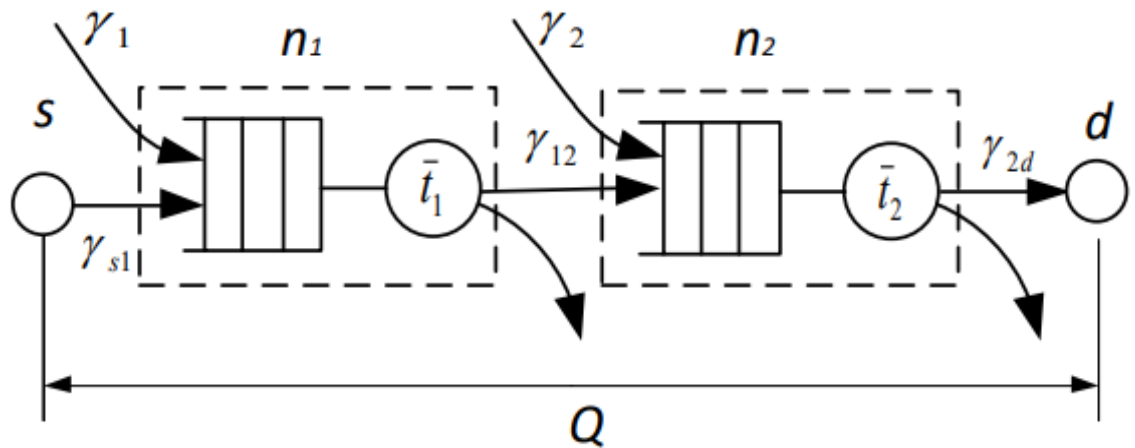


Рисунок 3.15. Модель маршруту доставки даних між сенсорною мережею та маршрутизатором

Функцію розподілу часу доставки повідомлення по маршруту в такій системі можна описати розподілом Ерланга.

При равенстве всех $\lambda_i = \lambda$ та $\mu_i = \mu$, $\bar{t}_i = \bar{t}$ для всіх комутаторів ($i = \overline{1, m}$) із середнім значенням часу обслуговування $m \cdot \bar{t}$ кожним, то середній час Q , необхідний для доставки запиту за маршрутом:

$$Q = m \cdot \bar{t}. \quad (3.14)$$

Ймовірність доставки запиту за кількістю маршрутизаторів в ланцюзі $m = 1, 2, 3, 4$ визначається наступним чином:

$$p_m = \frac{(m \cdot \mu)^m}{m!} \cdot e^{-m \cdot \mu} \quad (3.15)$$

та за графіком рис.3.16, де видно, що при збільшенні ланцюга передачі запиту ймовірність його доставки зменшується.

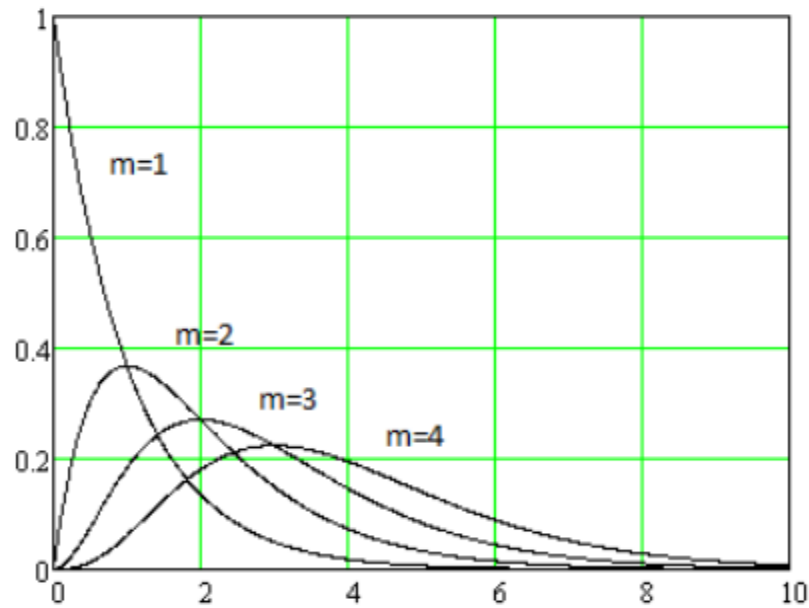


Рисунок 3.16. Щільність ймовірності часу доставки запиту за кількістю маршрутизаторів в ланцюзі $m = 1, 2, 3, 4$

Порядок m в даному випадку відповідає числу транзитів (стрибків), припускаючи, що час передачі (обслуговування) повідомлення на кожному з них однаковий. Наближення даної СМО до мережі Джексона, ймовірно, точніше при значном n і чим ближче розподіл часу обслуговування до експоненціального розподілу. При відносно невеликій кількості n вузлів і невеликій кількості маршрутів властивості мережі можуть істотно відрізнятись від властивостей мережі Джексона. При цьому модель маршруту можна охарактеризувати як багатофазну систему G/G/1. Отримати функцію розподілу часу доставки в цьому випадку може бути дуже складно. Однак приблизна оцінка середнього часу доставки по j -му каналу маршруту можлива як:

$$\tilde{T}_j \approx \frac{\rho_j \cdot \bar{t}_j}{2 \cdot (1 - \rho_j)} \left(\frac{\sigma_{a_j}^2 + \sigma_{t_j}^2}{\bar{t}_j^2} \right) \left(\frac{\bar{t}_j^2 + \sigma_{t_j}^2}{a_j^2 + \sigma_{t_j}^2} \right), \quad (3.16)$$

де $\rho_j = \lambda_j \bar{t}_j$;

$\sigma_{a_j}^2$ - дисперсія інтервалів між запитами;

$\sigma_{t_j}^2$ - відхилення часу обслуговування запиту в j -му каналі;

\bar{t}_j - середній час обслуговування в j -му каналі;

$a_j = \frac{1}{\lambda_j}$ - середнє значення інтервалу між запитами в j -му каналі.

Тоді час доставки за k -маршрутом буде дорівнює:

$$Q = \sum_{o=1}^{m_k} \tilde{T}_j, \quad (3.17)$$

де m_k - кількість каналів по k -му маршруту.

Слід зазначити, що оцінки середнього часу доставки за маршрутом тим точніше, чим вище інтенсивність потоку запитів і тим менше зв'язок між часом обслуговування в каналі і моментами отримання запитів на вході кожного з каналів. Очевидно, що одним з визначальних факторів часу доставки є кількість «стрибків» (каналів) на маршруті. Це число залежить від використовуваних методів вибору маршруту. Логічно припустити, щоб обраний маршрут був мінімальної довжини.

3.9. Натільні мережі в літаковій сенсорній мережі

В даний час активно розвиваються напрямками мереж медичних органів:

- носима фітнес-електроніка, яка грає роль наставника в підтримці людиною здорового способу життя (сон, фізична активність і т.і.). Дані, зібрані зі всіляких браслетів, смарт-годинників, крокомірів, нейронних інтерфейсів, доставляються в хмарний сервіс через смартфон, який використовується як шлюз. Як правило, дана продукція не вимагає суворої медичної сертифікації;
- спеціалізований одяг і високоточні датчики для збору даних про стан здоров'я людини за ключовими показниками (пульс, рівень цукру і т.д.). Датчики встановлюються в костюмах спортсменів і людей екстремальних професій. Дана продукція підлягає обов'язковій медичній сертифікації;
- медичні наносети імплантуються безпосередньо в тіло людського організму

і взаємодіють через спеціалізований шлюз.

Даний напрямок знаходиться на стадії наукових досліджень, але отримані результати прогнозують широке застосування даного типу мереж. У свою чергу, зібрані дані повинні бути доставлені в єдиний центр для зберігання і подальшої обробки. Для цих цілей доцільно використовувати безпілотні літальні апарати, здатні швидко облітати район дислокації людей і передавати дані на хмарний сервер за радіоканалом. Прикладом такої взаємодії може бути група скелелазів, які потрапили в лавину снігу. БПЛА здатний за лічені хвилини прибути на місце аварії, облетіти місцевість, зафіксувати місце, де знаходяться люди, і транслювати дані з мережі тіла про стан їх здоров'я на хмарний сервер (рис. 3.17).

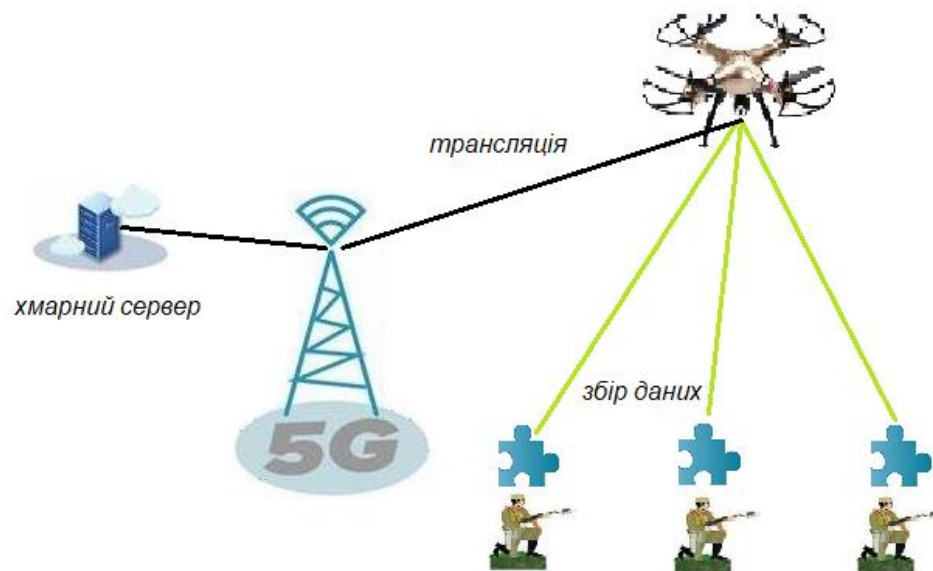


Рисунок 3.17. Збір даних з натільних мереж на базі БПЛА

3.10. Модель взаємодії в середині літакового сегмента в літаковій сенсорній мережі

Один або кілька БПЛА можуть бути використані для завдань збору даних і трансляції. Автономний політ БПЛА здійснюється на підставі польотного завдання, попередньо завантаженого в його контролер. Незважаючи на повну автономність польоту, канал телеметрії

використовується для спостереження за параметрами БПЛА і оцінки необхідності здійснення аварійної посадки. З урахуванням того, що службові дані передаються по каналу і завантаженість каналу становить близько 60%, для ефективної передачі даних з сенсорних вузлів залишається невеликий ресурс каналу. Таким чином, існує проблема гарантованої доставки даних з сенсорних вузлів на хмарний сервер.

Можуть змінюватися такі параметри натільних мереж:

- кількість осіб;
- кількість БПЛА;
- радіус радіопокриття БПЛА;
- розмір території, на якій знаходяться люди;
- частота (різні канали взаємодії).

Якість обслуговування трафіку в контексті цього завдання визначається часом доставки даних з вузла сенсорної мережі на сервер. Параметрами мережі є пропускна здатність каналу передачі даних і кількість БПЛА, необхідних для виконання завдання. Щоб побудувати модель, зробимо наступні припущення:

- потрібно передати дані з групи n сенсорних вузлів;
- вузли розташовані хаотично і утворюють поле Пуассона;
- кожен з сенсорних вузлів періодично передає фіксовану кількість даних в кількості ν байт;
- дані з кожного сенсорного вузла повинні доставлятися на сервер збору за час, не більш τ_0 ;
- у структуру сенсорної мережі входить сегмент сенсорних вузлів, літаковий сегмент мережі доступу, шлюз і сегмент мережі передачі даних між шлюзом і сервером;
- припустимо, що вузьким місцем в даній структурі є сегмент мережі доступу. Надалі ми будемо розглядати тільки параметри сегмента доступу, вважаючи, що параметри інших елементів мережі мають значний запас пропускної здатності;

- мережа доступу будується на основі маршрутизаторів, розташованих на БПЛА. В цілому в зоні обслуговування можуть бути k БПЛА, а зони покриття вузлів датчика можуть перетинатися, як показано на рис.3.18, де IoT4-IoT6 обслуговується тільки БПЛА № 1, IoT1-IoT2 обслуговується тільки БПЛА № 2, а IoT3 може обслуговуватися як БПЛА № 1, так і БПЛА № 2.

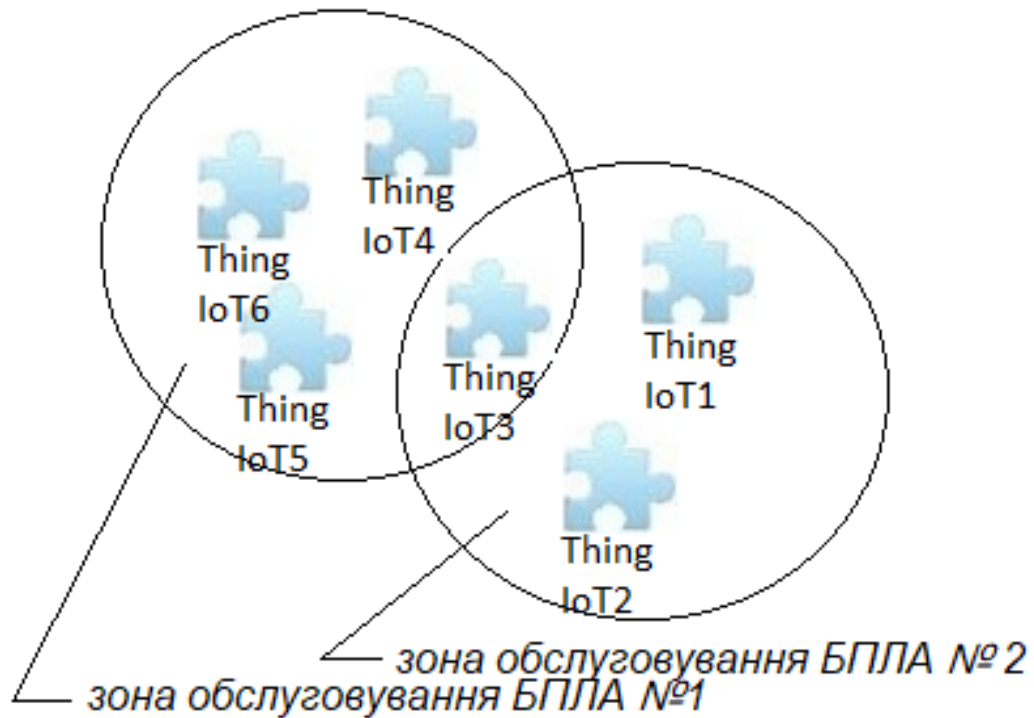


Рисунок 3.18. Модель зон сенсорної мережі, що обслуговується БПЛА

- зона може обслуговуватися декількома БПЛА;
- БПЛА в якийсь час має випадкове розташування з розподілом за законом Пуассона;
- кожен БПЛА-маршрутизатор здатний самостійно призначати частоту радіоканалу для зв'язків з сенсорними вузлами;
- якщо всі канали маршрутизаторів зайняті, то сенсорний вузол очікує вільний канал.

Час доставки даних через мережу визначається швидкістю передачі (часом обслуговування) в каналі маршрутизатора та часом очікування початку передачі запитів від сенсорного вузла:

$$\bar{T} = \bar{W} + \bar{t}. \quad (3.18)$$

Вхідний потік з досить великої кількості вузлів n можна описати моделлю найпростішого потоку, інтенсивність якого дорівнює:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{ (заявок/с)}, \quad (3.19)$$

де λ_i — інтенсивність потоку, що утворюється i -м вузлом.

Середній обсяг переданих даних становить:

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^n v_i \text{ (бит)}, \quad (3.20)$$

де v_i — кількість даних, що утворюється i -м вузлом.

При постійній швидкості передачі даних в каналі b (біт/с) середній час обслуговування запитів буде дорівнює:

$$\bar{t} = t_s + \frac{\bar{v}}{b} \text{ (с)}, \quad (3.21)$$

де t_s — час, необхідний для вибору каналу і встановлення з'єднання.

Якщо в момент пробудження сенсорний вузол мережі вибере вільний в даний час частотний канал маршрутизатора, тобто канал, по якому в даний момент не передається трафік, то модель може бути описана як M/G/k з дисципліною обслуговування з очікуванням (рис.3.19). Якщо вважати, що канали маршрутизатора $\bar{1}, k$ ідентичні, то їх загальна пропускна здатність буде дорівнювати:

$$\mu_k = \frac{k}{\bar{t}} \text{ (запитів/с)}, \quad (3.22)$$

а модель обслуговування вузлів сенсорної мережі може бути представлена як на рис.3.19.

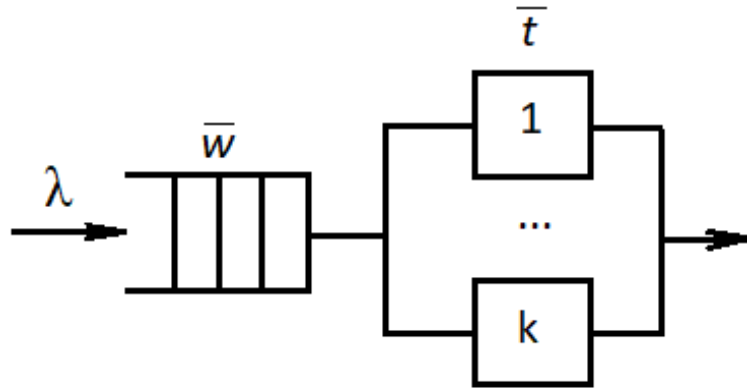


Рисунок 3.19. Модель обслуговування вузлів сенсорної мережі

Якщо припустити, що час обслуговування запиту (час його передачі по каналу) випадковий і має експоненціальний розподіл, то для системи М/М/к за другою формулою Ерланга можна оцінити час очікування в черзі як:

$$\bar{W} = \frac{\frac{a^k \cdot k}{k! \cdot (k-a)}}{\left(\sum_{i=0}^{k-1} \frac{a^i}{i!} + \frac{a^k \cdot k}{k! \cdot (k-a)} \right) (k\mu - \lambda)} \quad (c), \quad (3.23)$$

де $a = \lambda \cdot \bar{t}$ - інтенсивність навантаження (Ерл);

k - кількість доступних каналів;

$\mu = \frac{1}{\bar{t}}$ - середня кількість запитів, що обслуговуються (передаються)

одним каналом за одиницю часу.

3.11. Модель літакової сенсорної мережі для передачі даних на великі відстані

З урахуванням аналізу типових структур побудови ЛСМ була розроблена архітектура мережі передачі даних на великі відстані (рис.3.20), яка складається з:

- з наземного сегмента ЛСМ з безлічі сенсорних вузлів, які об'єднані в

бездротову сенсорну мережу;

- літакового сегмент ЛСМ, який включає в себе:

- маршрутизатор, який збирає дані з наземного сегмента мережі для подальшої передачі даних за технологією LoRa [64] та виконує роль шлюзу 6LoWPAN - LoRa;

- групи безпілотних літальних апаратів (ретранслятори на базі БПЛА), що виконують ретрансляцію даних за технологією LoRa для подальшої доставки до шлюзу з IP-мережею;

- мережа базових станцій LPWAN – Інтернет (базова станція LoRa-IP).

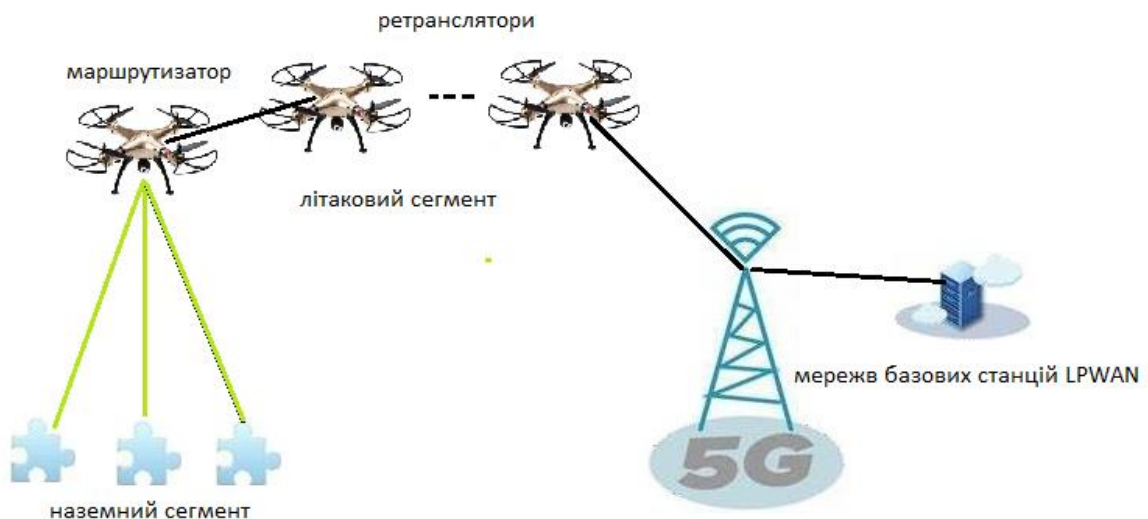


Рисунок 3.20. Архітектура мережі передачі даних на великі відстані

Для наземного сегменту ЛСМ технологія передачі даних IEEE 802.15.4 розглядається як найбільш поширена з можливостями збору даних з сенсорних полів. Прикладом можуть служити протоколи, в яких використовується стандарт IEEE 802.15.4 [64]: ZigBee, 6LoWPAN, Thread, RPL і т.і.

Для літакового сегменту ЛСМ технологія IEEE 802.15.4g може бути застосована для ретрансляції даних між БПЛА-ретрансляторами. Прикладом

можуть служити протоколи, в яких використовується стандарт IEEE 802.15.4g [64]: LoRa, SigFox, STRIZH тощо [36, 87, 178].

3.12. Модель маршруту доставки пакетів даних в літаковій сенсорній мережі

Маршрут доставки даних між джерелом даних S зі складу наземної сенсорної мережі і вузлом призначення D зі складу мережі 5G містить кілька ділянок (транзитів) k , утворених парами передавач-приймач БПЛА-ретрансляторами (див.рис.3.21), де Router 1 – є маршрутизатором, а Router i -Router k – є ретрансляторами.

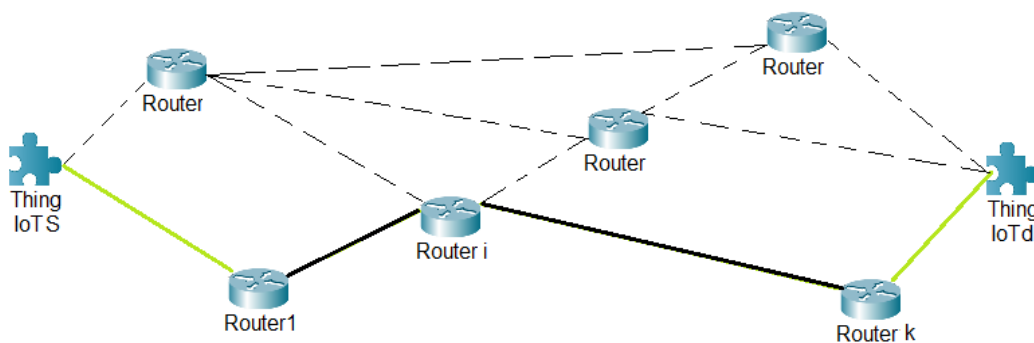


Рисунок 3.21. Модель маршруту доставки даних

На мережевому рівні параметром моделі є лише кількість транзитів k . Логіка вибору маршруту далі в моделі не враховується.

На каналному рівні кожен з ретрансляційних вузлів містить буфер для зберігання деякої (обмеженої) кількості прийнятих даних, які будуть передані на наступний ретрансляційний вузол. Модель взаємодії між вузлами можна представити у вигляді системи масового обслуговування з комбінованою дисципліною обслуговування (затримка і втрата). Маршрут в цілому являє собою багатофазну систему масового обслуговування, утворену

послідовністю моделей ретрансляційних вузлів (див.рис.3.22), де

$W_1..W_k$ - час очікування запиту в черзі на ретрансляційних вузлах 1..k відповідно;

$\bar{t}_1.. \bar{t}_k$ - середній час обслуговування запиту на ретрансляційних вузлах 1..k відповідно;

$p_1..p_k$ - імовірність втрати запиту на ретрансляційних вузлах 1..k відповідно.

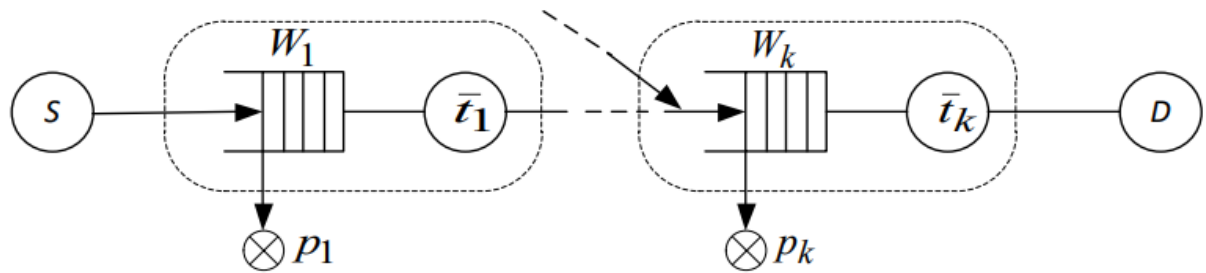


Рисунок 3.22. Модель маршруту доставки даних

Імовірність втрати запитів на маршруті можна визначити як:

$$p = 1 - \prod_{i=1}^k \left(1 - \frac{1 - \rho_i}{1 - \rho_i \frac{C_a^2 + C_s^2}{2} \cdot \rho_i^{\frac{2}{C_a^2 + C_s^2} n_{b_i}}} \right), \quad (3.32)$$

де C_a^2 и C_s^2 — квадратичні коефіцієнти варіації відповідно розподілів вхідного потоку і часу обслуговування для i -го вузла;

n_{b_i} — розмір буфера для i -го вузла;

ρ_i — завантаження i -го вузла.

Середній час обслуговування запитів в i -му вузлі можна визначити як:

$$T_i = \frac{\rho_i \bar{t}_i}{2(1 - \rho_i)} \cdot \left(\frac{\sigma_a^2 + \sigma_s^2}{\bar{t}_i^2} \right) \cdot \left(\frac{\bar{t}_i^2 + \sigma_s^2}{\bar{a}_i + \sigma_s^2} \right) + \bar{t}_i, \quad (3.33)$$

де σ_a^2 , σ_s^2 — дисперсія часових інтервалів між запитами і часу обслуговування i -го вузла відповідно;

\bar{a}_i — середній інтервал між запитами i -го вузла;

\bar{t}_i — середній час обслуговування запиту i -го вузла.

Середній час обслуговування запиту на маршруті дорівнює:

$$T = \sum_{i=1}^k T_i, \quad (3.34)$$

Моделі (3.32)-(3.34) дають приблизну оцінку ймовірності втрати запитів і середнього часу обслуговування запиту на весь маршрут від сенсорного вузла S наземної мережі до вузла призначення D . Ця модель передбачає, що відомі оцінки середнього часу обслуговування запиту на кожній з ділянок маршруту \bar{t}_i . Цей час залежить від швидкості передачі даних на ділянці маршруту і розміру пакетів. Швидкість передачі даних на ділянці, в свою чергу, залежить від умов поширення радіосигналу і може бути описана однією з відомих моделей:

$$\bar{t}_i = \frac{\bar{l}}{b_i}, \quad (3.30)$$

де \bar{l} — середня довжина пакету (біт);

b_i — швидкість передачі даних на i -ділянці маршруту (біт/с).

На фізичному рівні слід розглядати процеси, що впливають на умови поширення сигналу, такі як загасання в середовищі поширення, згасання сигналу в каналі і різного роду перешкоди, що впливають на умови поширення. Щоб спростити модель на цьому рівні, ми будемо пов'язувати швидкість передачі даних в каналі тільки з відстанню між вузлами та частотою радіосигналу.

Згідно специфікації LoRaWAN [64], швидкість передачі залежить від рівня сигналу на вході приймача, як показано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Швидкість передавання даних

Рівень сигналу на вході приймача, дБм	Швидкість передавання даних, біт/с
-121	50000
-122	10937

-123	5468
-126	3125
-129	1757
-132	976
-135	537
-137	292

Потужність сигналу на вході приймача буде описуватися як:

$$P_{RX} = P_{TX} - A, \quad (3.31)$$

де P_{RX} — потужність сигналу на вході приймача (дБм);

P_{TX} — вихідна потужність передавача (дБм);

A — загасання сигналу (дБ).

В якості моделі загасання вибираємо модель:

$$A = 20 \cdot \lg\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right), \quad (3.37)$$

де λ — довжина хвилі радіовипромінювання (м);

d — відстань між приймачем і передавачем (м).

Залежність загасання сигналу від відстані між передавачем і приймачем та частоти випромінювання представлена на рис.3.23.

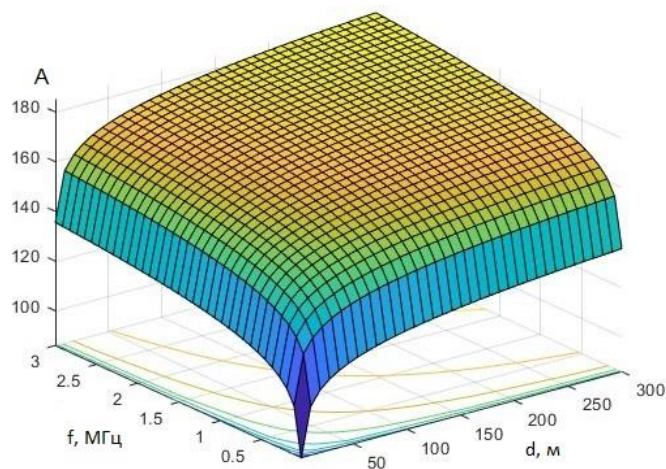


Рисунок 3.23. Залежність загасання сигналу від відстані між передавачем і приймачем та частоти випромінювання

На рис.3.23 видно, що загасання сигналу збільшується як зі збільшенням відстані між передавачем та приймачем, так і зі збільшенням частоти випромінювання.

Залежність потужності сигналу на вході приймача від відстані між передавачем і приймачем та частоти випромінювання представлена на рис.3.24.

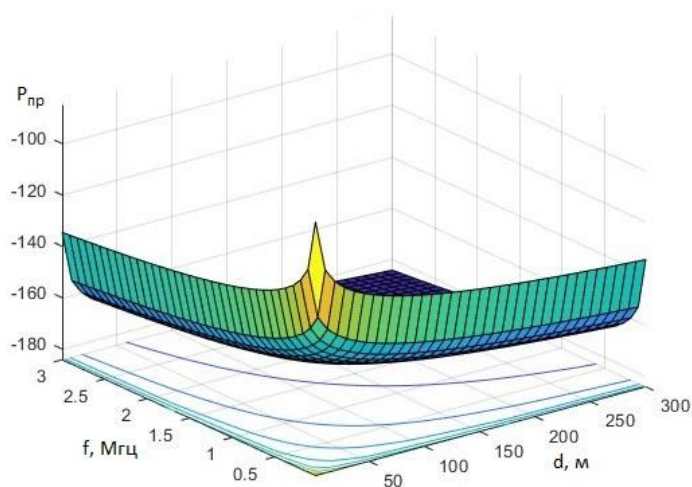


Рисунок 3.24. Залежність вхідної потужності приймача від відстані між передавачем і приймачем та частоти випромінювання

На рис.3.24 видно, що потужності сигналу на вході приймача зменшується як зі збільшенням відстані між передавачем та приймачем, так і зі збільшенням частоти випромінювання.

Залежність швидкості передачі від відстані між приймачем і передавачем представлена на рис.3.25.

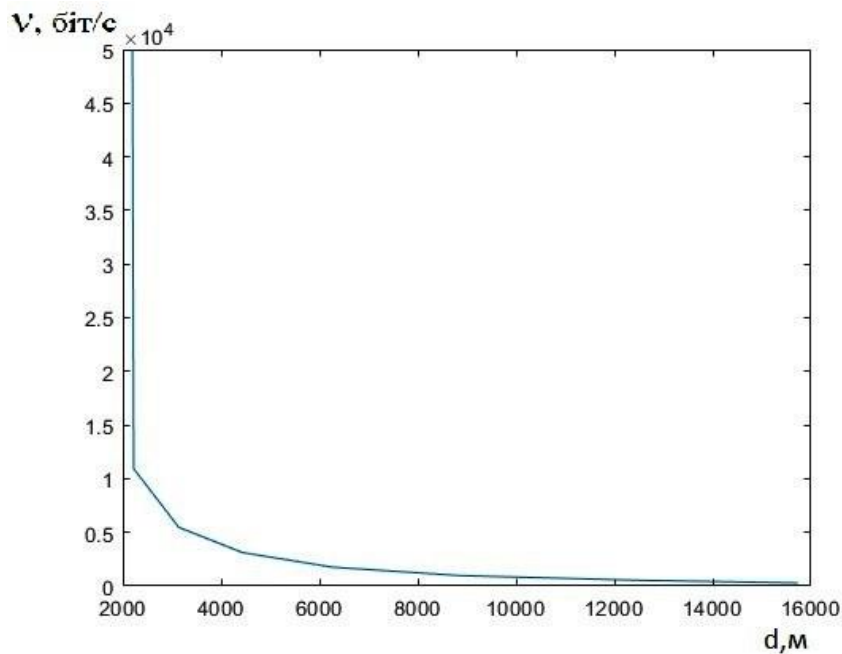


Рисунок 3.25. Залежність швидкості передачі від відстані між приймачем і передавачем

На рис.3.25 видно, що швидкість передачі від передавача до приймача суттєво зменшується зі збільшенням відстані між передавачем та приймачем.

Оскільки чутливість радіоприймача LoRa забезпечує прийом сигналу з низьким рівнем сигналу (табл.3.1), а загасання сигналу оцінюється за даними (3,37), то потенційні відстані передачі сигналу настільки великі, що необхідно враховувати кривизну землі і висоту розміщення антени сенсорного вузла наземного сегмента та висоту польоту маршрутизатора.

Відстань прямої видимості (км) можна визначити як:

$$d_{\max} = 3,57 \cdot 4,12 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (3.38)$$

де h_1 и h_2 — висота антени передавача маршрутизатора та приймача сенсорного вузла наземного сегмента відповідно (м), або за графіком:

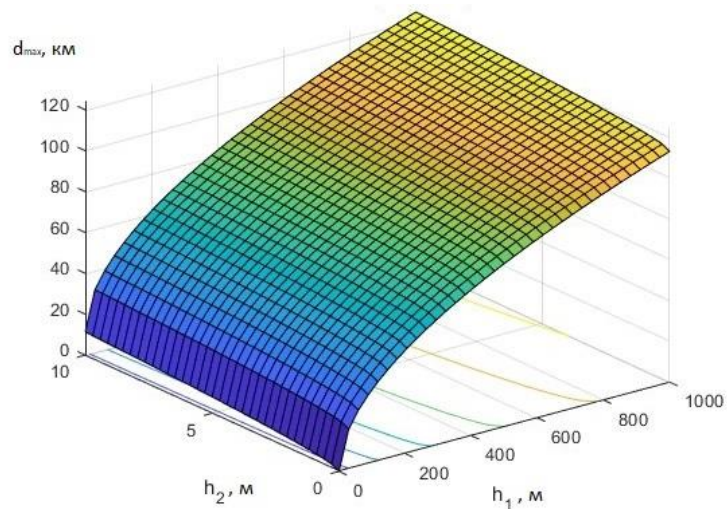


Рисунок 3.26. Залежність відстані прямої видимості від висоти антени передавача маршрутизатора (h_1) та приймача сенсорного вузла наземного сегмента (h_2)

На рис.3.26 видно, що низке розташування сенсорних вузлів наземного сегмента та обмежена висота польоту маршрутизатора значно впливають на відстань прямої видимості та можуть звужити зону обслуговування. З іншої сторони, для передачі даних на велику відстань треба маршрутизатору літати на великій висоті, але на такій висоті не забезпечується зв'язок з сенсорним вузлами наземного сегменту за їх малопотужних передавачів.

Цей же графік визначає вимоги щодо застосування БПЛА-ретрансляторів, які для передачі даних на сотні кілометрів повинні підніматися на висоту в одиниці кілометрів.

3.13. Алгоритм передачі функції маршрутизатора в літаковій сенсорній мережі

Основною функцією маршрутизатора є збір даних з вузлів сенсорної мережі. Якщо маршрутизатор не може виконувати свої функції, то його треба замінити на інший маршрутизатор, т.я. зібрані дані можуть бути втрачені, а також не буде здійснено обслуговування наступних сенсорних вузлів. Як

правило, маршрутизатор потребує заміни, якщо запас енергії його системи енергозабезпечення вже становить незадовільний рівень, або за будь-якими причинами втрачений зв'язок з ним. Вибір нового маршрутизатора може базуватися і на інших критеріях, а також може бути автоматизованим з інтелектуальною логікою управління. Процедуру заміни маршрутизатора ініціює координатор (див.п.3.3). Якщо заміна склалася, потрібні інші БПЛА, які можуть виконувати функції маршрутизатора, тому в складі ЛСМ повинний бути не один, а декілька БПЛА, які об'єднані в окремий кластер маршрутизаторів, які можуть обмінюватися як службовою інформацією про стан елементів ЛСМ, так і зібраними даними від наземного сегменту. Наявність такого резервування забезпечує цілісність зібраних даних та надійність функціонування своєї ЛСМ. Кількісний склад кластеру буде розглянутий у п.3.13. Новопризначений маршрутизатор поновлює власні таблиці зв'язності як з координатором, так і з сенсорними вузлами наземного сегменту, і встановлює зв'язок з сенсорними вузлами наземного сегменту та з координатором.

Пояснення передачі функцій маршрутизатора від одного БПЛА до іншого на основі критерію «рівень заряду батареї» показано на рис.3.32. Час польоту літакового сегменту ЛСМ T_M складається з часток $t_i, i = \overline{1, N}$:

$$T_M = \sum_{i=1}^N t_i, \quad (3.39)$$

де t_i — час польоту i -го БПЛА з функцією маршрутизатора;

N — кількість БПЛА в складі кластеру маршрутизаторів.

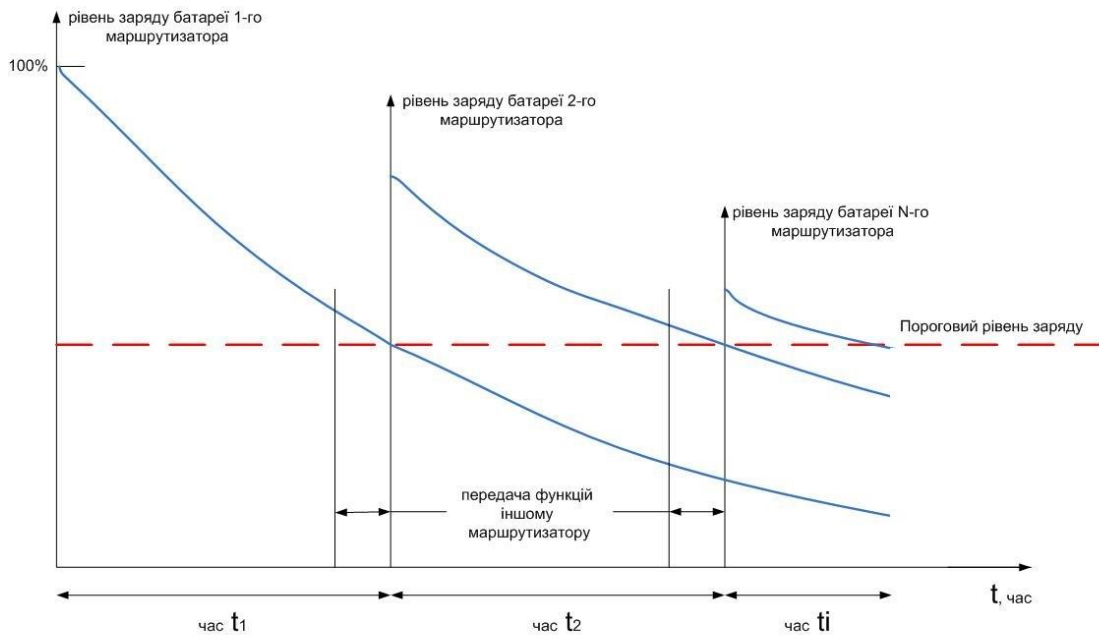


Рисунок 3.32. Передачі функцій маршрутизатора від одного БПЛА до іншого на основі критерію «рівень заряду батареї»

На рис. 3.32 зображена в часі процедура зміни маршрутизатором впродовж всього маршруту. За час з моменту старту до моменту часу t_1 функції маршрутизатора виконує БПЛА № 1 зі складу кластеру маршрутизаторів. До моменту t_1 він здійснює польот та забезпечує зв'язок як з сенсорними вузлами наземної мережі, так і з координатором польоту, на що витрачається заряд його електричної батареї. В момент t_1 рівень заряду його електричної батареї падає до порогового рівня, який необхідний, наприклад, для повернення на базу постійної дислокації. За короткий період часу 1-й маршрутизатор складає свої повноваження та передає свої функції до іншого маршрутизатора, якого призначає координатор польоту. Через деякий час процедура повторюється і ця функція передається іншому БПЛА з кластеру маршрутизаторів. І так до кінця польоту.

Алгоритм роботи координатора польоту щодо зміни маршрутизатора представлений на рис.3.33.

3.14. Математична модель розрахунку необхідної кількості маршрутизаторів в літаковій сенсорній мережі

В ЛСМ кожен маршрутизатор – це БПЛА, який виконує політ з програмою та витрачає енергію свого джерела живлення як на здійснення самого польоту, так і на обмін даними між сенсорними вузлами наземної мережі, а також і з ретрансляційними вузлами. Так може статися, що енергії його джерела живлення буде не достатньо на весь маршрут польоту. В такому разі маршрутизатор повинний бути не один, а в складі кластера маршрутизаторів, де кожен з його членів може виконувати функцію маршрутизатора, але в кожен момент часу функцію маршрутизатора ЛСМ виконує тільки один з них, він здійснює основний обмін даними в мережі з відповідною втратою енергії на цю діяльність:

$$E = E_{\text{обмін}} + E_{\text{двіг}}, \quad (3.40)$$

де E - енергія акумулятора БПЛА (Вт);

$E_{\text{обмін}}$ - енергія, яку тратить БПЛА на здійснення обміну даними між сенсорними вузлами наземної мережі, а також і з ретрансляційними вузлами (Вт);

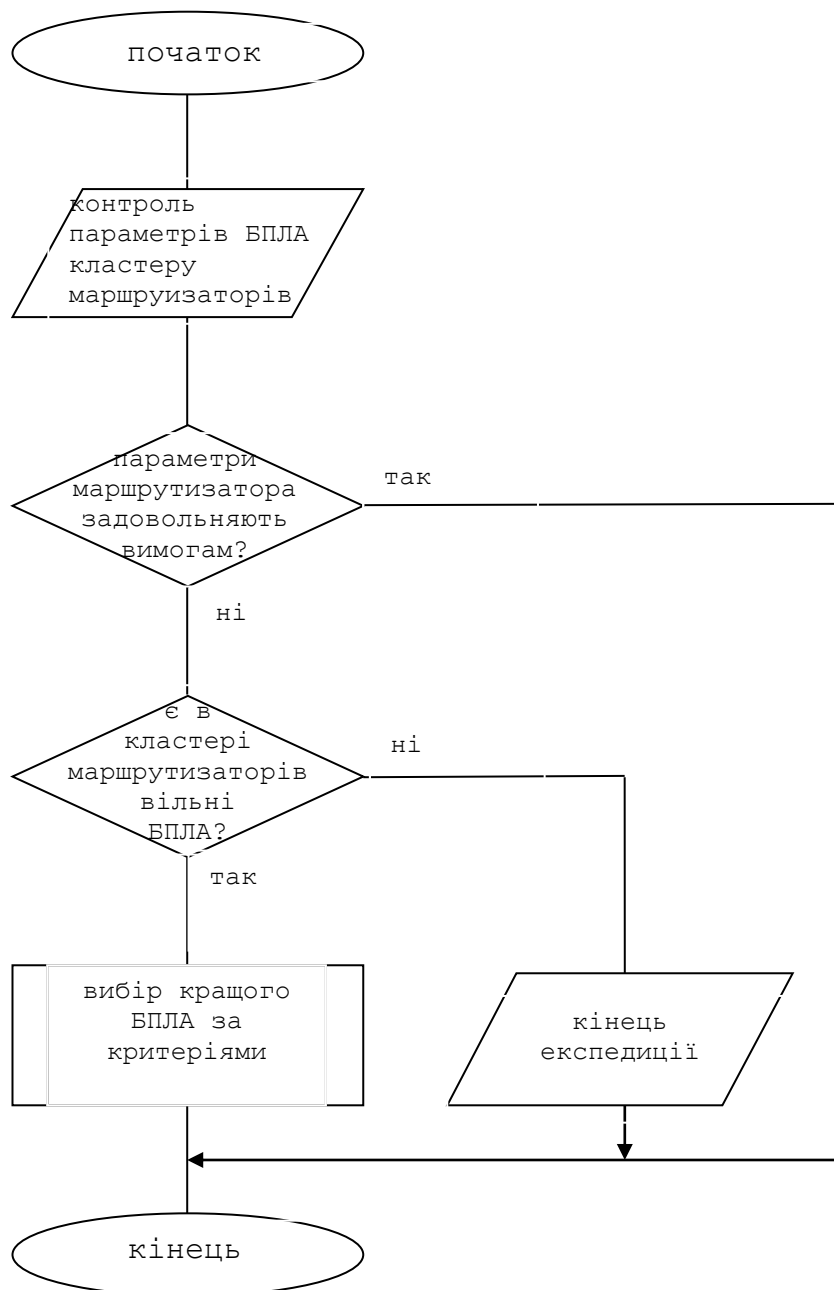


Рисунок 3.33. Алгоритм роботи координатора польоту щодо зміни маршрутизатора

$E_{\text{двіг}}$ - енергія, яку тратить БПЛА для свого переміщення за маршрутом (Вт).

Кожен БПЛА в складі кластеру маршрутизаторів повинний повернутися на базу постійного розташування, тому на цю частину у всіх маршрутизаторів втрати рівні:

$$E_{\text{двіг}} = 2 \cdot t_M \cdot I_{\text{двіг}}, \quad (3.41)$$

де t_M - розрахунковий час руху за маршрутом (час);

$I_{\text{овіг}}$ - інтенсивність втрат енергії на рух (Вт/час).

$$E_{\text{обмін}} = E - E_{\text{овіг}} = I_{\text{обмін}} \cdot t_{\text{обмін}}, \quad (3.42)$$

де $I_{\text{обмін}}$ - інтенсивність втрат енергії на обмін (Вт/час);

$t_{\text{обмін}}$ - час обміну даними кожним маршрутизатором (час).

Отже, кількість БПЛА в кластері маршрутизаторів (N) з подальним округленням у бік збільшення дорівнює:

$$N = \frac{t_M}{t_{\text{обмін}}}. \quad (3.43)$$

Резервні маршрутизатори не здійснюють активного обміну даними, тому втрати енергії їх джерел живлення значно менші.

3.15. Висновки за розділом 3

За результатами дослідження, проведеного в третьому розділі, можна зробити наступні висновки:

1. Вдосконалена модель безпілотного літального апарату, яка відрізняється від відомих тим, що БПЛА представлений у вигляді системи масового обслуговування, яка враховує параметри швидкості руху БПЛА, висоту його польоту і щільність наземної сенсорної мережі.

2. Визначено, що час доставки даних сенсорних вузлів наземного сегмента при використанні БПЛА як засобу доставки залежить від швидкості його руху, часу взаємодії з вузлом мережі і щільності вузлів в зоні обслуговування.

3. Вдосконалена модель взаємодії БПЛА з вузлами БСС, яка відрізняється від відомих тим, що може бути описана як система масового обслуговування, характеристики якої залежать від розподілу вузлів по території, часу взаємодії з вузлами мережі, радіуса обслуговування і швидкості руху БПЛА.

4. Вдосконалена модель детермінованого потоку запитів за відомими координатами вузлів ЛСМ, оптимізація обслуговування якої може бути досягнута шляхом планування обслуговування вузлів мережі.

5. Вдосконалена сервісна модель обслуговування запитів від вузлів БСС при невідомих координатах їх розташування, яка може бути представлена у вигляді системи черг з виходом заявок з черги (з обмеженим часом очікування).

6. Вдосконалена модель для рою безпілотних літальних апаратів, що відрізняється від відомих тим, що рій БПЛА представлений у вигляді мережі черги, а основною характеристикою моделі є середня тривалість передачі інформації між елементами рою.

7. Розроблений алгоритм роботи координатора польоту ЛСМ щодо зміни маршрутизатора, який відрізняється від відомих тим, що враховує необхідність своєчасної заміни маршрутизатора для забезпечення збереження отриманих даних та для продовження польоту за маршрутом.

8. Розроблена математична модель розрахунку необхідної кількості маршрутизаторів в літаковій сенсорній мережі, яка відрізняється від відомих тим, що за рахунок знання інтенсивності енергетичних втрат БПЛА на політ і радіоз'вязок можливо заздалегідь розрахувати необхідну кількість маршрутизаторів на вісь маршрут польоту.

РОЗДІЛ 4. МЕТОДОЛОГІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДАННЯ ЯКІСНИХ СЕРВІСІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ В МЕРЕЖІ СТАНДАРТУ 5G

Назва цього розділу повністю збігається з назвою всього дисертаційного дослідження. Ця методологія включає зміст та алгоритми управління трафіком від пристроїв IoT в мережі стандарту 5G, які забезпечують максимально ефективно надання їм сервісів.

Якість послуг IoT в мережі 5G забезпечується рядом технологічних удосконалень, які були впроваджені в ній, які надали мережі 5G ряд нових властивостей:

- велика пропускна здатність. Мережа 5G забезпечує набагато більшу пропускну здатність в порівнянні з попередніми поколіннями мобільних мереж, що дозволяє підключати велику кількість IoT-пристроїв і забезпечує більш швидку і стабільну передачу даних;
- низька затримка обробки запитів. Мережа 5G має дуже низьку затримку (затримку) передачі пакетів даних, що дозволяє пристроям IoT спілкуватися швидко і надійно;
- висока надійність. Мережа 5G забезпечує високу надійність з'єднання, що особливо важливо для пристроїв IoT, які можна використовувати для моніторингу та управління критично важливими системами, такими як безпілотні літальні апарати;
- покращене покриття. Мережа 5G має дуже широке покриття і краще проникнення в будівлі, що дозволяє IoT-пристроєм більш надійно працювати в приміщенні;
- нові можливості передачі даних. Мережа 5G підтримує нові технології передачі даних, такі як NB-IoT і LTE-M, які забезпечують більш ефективно використання енергії і розширений діапазон частот передачі даних.

Всі ці вдосконалень дозволяють мережам 5G надавати високоякісні послуги для пристроїв IoT.

Згідно з (2.2) забезпечення надання якісних сервісів IoT в мережі стандарту 5G здійснюється шляхом як адаптації структури мережі IoT під вимоги мережі 5G, так і шляхом адаптації параметрів якості обслуговування мережі 5G під вимоги мережі IoT. Перший шлях розглянутий в розділі 3, другому шляху присвячений цей розділ.

4.1. Методологія надання якісних сервісів IoT в мережі 5G

Методологія орієнтована на рішення практичної проблеми надання якісних сервісів IoT в мережі 5G, складає набір алгоритмів та математичну модель їх використання, за допомогою яких можливо адаптивне керування обслуговуванням агрегованого трафіку, який складається як з декілька потоків мультимедійного трафіку за різними пріоритетами, так і з потоків даних від пристроїв IoT теж за своїми численними пріоритетами. Розроблений алгоритм пріоритетного обслуговування пакетів агрегованого потоку в мережі 5G, в якому шляхом динамічної модифікації поля DSCP в заголовках пакету для IP-пакетів, що зазнали негативного впливу, на мережевому рівні (шлюзом P-GW) здійснюється швидше їх обслуговування у вузлах мережі, що дозволяє контролювати такий параметр якості обслуговування як час затримки для IoT-пакетів та гарантувати наскрізне його значення. Цей алгоритм забезпечує оцінку критичного рівня часу затримки буферизації для пакетів IoT, що спізнюються, та змінює пріоритети цих пакетів в агрегованому трафіку мережі 5G, що не дозволяє придушення менш пріоритетних IoT-потоків потоками мультимедійного трафіку з найвищим пріоритетом. Для цього пропонується встановлення для кожної зони пріоритетності буферного ресурсу свій допустимий лічильник часу затримки пакетів, який на основі аналізу рівнів затримок буде маркуватиме пакети за допомогою бітів у полі DSCP заголовку IP-пакетів та обслуговуватиме їх з підвищеною пріоритетністю. Пакети з найвищим пріоритетом обслуговуються відразу та вже не піддається буферизації у

вузлах.

4.2. Рівні методології надання якісних сервісів IoT в мережі 5G

Філософський рівень методології надання якісних сервісів IoT в мережі 5G, в основі якого лежить діалектичний принцип, складають загальні принципи пізнання:

- об'єктивність і визначеність надання сервісів певними умовами, факторами, причинами. У розділі 1 розглянути поняття мобільних мереж п'ятого покоління та мереж IoT, перелік типів з'єднання та характеристики таких з'єднань в мережі п'ятого покоління, визначення терміна «якість обслуговування» та перелік типових рішень щодо забезпечення якості обслуговування. Наукова новизна цього дисертаційного дослідження базується саме на застосуванні цих рішень при організації взаємодії мережі IoT з мережею стандарту 5G;

- цілісний підхід до вивчення надання сервісів і процесів, які здійснюються в мережі стандарту 5G при цьому. У розділі 2 запропонована концептуальна модель **взаємодії мережі 5G з мережею IoT**, яка визначає структуру та властивості її елементів, а також враховує вхідні, вихідні параметри, зовнішні фактори та керуючий вплив. Така модель в самому загальному вигляді була визначена залежністю (2.1);

- розгляд надання сервісів в його зв'язках і взаємодії з іншими процесами в мережі стандарту 5G. Якість в системі **взаємодії мережі 5G з мережею IoT** можливо забезпечити як адаптивним управлінням шляхом зміни політики обробки інформації в мережі стандарту 5G, так і зміною структури G самій системи IoT. Результатом адаптації будуть найкращі (оптимальні у цих умовах) показники якості обслуговування. При цьому адаптацію слід здійснювати на основі застосування принципів декомпозиції (окрема мережа IoT, окрема транспортна мережа), потім - системності (оцінювання **якості обслуговування з кінця в кінець**) та ітерації.

Параметри внутрішнього стану (надійність самого обладнання мережі, автономність його енергоживлення та ін.) в роботі не розглядаються. В цілому запропонована методологія дозволяє перейти від розв'язання багатокритеріальної задачі оптимізації великої розмірності до послідовності задач меншої розмірності, пов'язаних між собою вхідними і вихідними параметрами. В результаті в ході вирішення реалізується поетапний ітераційний вибір значень внутрішніх параметрів (параметричний синтез), при яких виконуються вимоги до якості обслуговування в мережі.

Другий рівень методології надання якісних сервісів IoT в мережі 5G включає в себе застосування загальнонаукових принципів і підходів, які широко поширені в сучасній науці. В дисертаційному дослідженні застосовані три основні методологічні підходи: структурно-функціональний, структурний і системний підходи, а також модельний, імовірнісний та інформаційний.

Третій рівень методології надання якісних сервісів IoT в мережі 5G охоплює конкретну наукову методологію в галузі інформаційних наук, а саме застосування методів нейро-нечітких множин, квантильної регресії та інтелектуального керування.

4.3. Загальна характеристика процесу надання якісних сервісів

В зовнішніх IP-орієнтованих мережах на практиці активно використовується механізм диференційованого обслуговування (Differentiated Service) Diffserv. В декількох специфікаціях описані його базові елементи архітектури:

- RFC 2474 (Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers) щодо способів маркування пакетів;
- RFC 2598 (An Expedited Forwarding PHB) і 2597 (Assured Forwarding PHB Group) щодо сервісів за різновидами;

- RFC 2475 (An Architecture for Differentiated Service) щодо взаємодії компонентів в архітектурній моделі DiffServ.

Архітектура механізму DiffServ передбачає наявність класифікаторів і формувачів трафіку на кордоні мережі, а також підтримує функцію виділення ресурсів в ядрі мережі для забезпечення необхідної покрокової політики обслуговування (Per-Hop Behavior - PHB). DiffServ розділяє трафік на класи шляхом введення декількох рівнів QoS. В мережі 5G мультимедійний трафік та трафік IoT обслуговуються як IP-пакети. Масштабованість архітектури DiffServ реалізується шляхом об'єднання класифікаційних ознак трафіку, де інформація про тип трафіку передається в заголовок IP пакета. При цьому складні операції класифікації, маркування, визначення правил обслуговування та формування трафіку виконуються тільки на кордонах мережі. Ознакою приналежності IP-пакета до певного класу DiffServ є спеціальна мітка, яка передається в поле пріоритету IP-пакета (ToS-байт), яке з появою стандартів DiffServ було перевизначено і названо DS-байт або DSCP (Differentiated Service Code Priority).

Основним моментом у моделі DiffServ є диференціювання трафіку шляхом його розбивки на класи з різними пріоритетами (рівнем QoS), і, як наслідок, головною задачею DiffServ є визначення і стандартизація байта диференційованої послуги (DS, RFC 2474). Байт DS у рамках архітектури DiffServ замінює байт типу обслуговування (Type of Service, ToS) із заголовка пакета IPv4 і байт класу трафіка (Traffic Class) пакета IPv6.

Специфікація RFC 2474 визначає байт DS (рис.4.1), поле коду диференційованої послуги DSCP і його маркування, від чого надалі залежить політика покрокового обслуговування пакета PHB, тобто рішення про просування пакета у кожному проміжному вузлі мережі, і як результат, наданий рівень QoS.

0	4	8	16	
3	7	15	31	
Версія протоколу	Довжина заголовку пакету	Тип сервісу (DS)		Загальна довжина пакету
Ідентифікатор			Прапор	Зміщення фрагменту
Час в мережі		Протокол		Контрольна сума

Рисунок 4.1. Перші три 32-бітних слова структури заголовка IP-пакета

У зв'язку з тим, що пристрої IoT є результатом продовження концепції M2M, а якість класів обслуговування для IoT ще не визначено, то для пристроїв IoT можливо застосувати класи пріоритетів, які визначені для пристроїв M2M (табл.4.1). Згідно з табл.4.1 існує чотири класу IoT-пристроїв з різними вимогами щодо QoS. Для кодування чотирьох класів достатньо двох бітів в полі заголовка IP-пакету. В загальному випадку IoT-пристроєм заздалегідь присвоюється певний пріоритет залежно від їхнього призначення. Всі повідомлення, які надсилає цій IoT-пристрій, будуть мати визначений пріоритет. Кожен пріоритет має свої допустимі параметри якості обслуговування, які повинні бути забезпечені в мережі 5G. Основним параметром всіх класів є затримка, яку можливо контролювати за допомогою окремого поля заголовку IP-пакету «Час в мережі». Якщо цей параметр якості обслуговування IP-пакету не може бути виконаний при визначеному пріоритеті, то такий пакет повинний обслуговуватися з більшим пріоритетом. На відміну від стандартної процедури планування в мережі 5G така особливість процедури планування зменшує перевантаження з боку базовій станції при плануванні радіоресурсів, а також забезпечує необхідний QoS для IoT-сервісів з урахування їх пріоритетів.

Таблиця 4.1

Класи якості для сервісів M2M/IoT пристроїв

QFI	Тип	Затримка допустима, мс	Кількість відмов допустимих, %	Клас обслуговування IoT
1	Гарантований час передавання даних, трафік реального часу	10	0,01	L1
2	Гарантований час передавання даних, трафік реального часу	20	0,1	L2
3	Гарантований час передавання даних, трафік не реального часу	1000	5	L3
4	Не гарантований час передавання даних, трафік не реального часу	-	-	L4

Дуже часто в мережі IoT виникають короткочасні відмови каналу за рахунок тимчасового погіршення відношення сигнал/шум різними зовнішніми факторами, інтерференція, багатопроменеve відбиття сигналів, затухання сигналу та інші, що особливо негативно впливають на потоковий трафік реального часу, який чутливий до часових параметрів якості обслуговування, оскільки у такому випадку виникає ситуація, коли за рахунок нестабільного радіоканалу появляються на мережевому рівні ефекти

джитеру та затримки в процесі переходу та формуванні IP пакетів із нижнього рівня на верхній мережевий окремої частини пакетів.

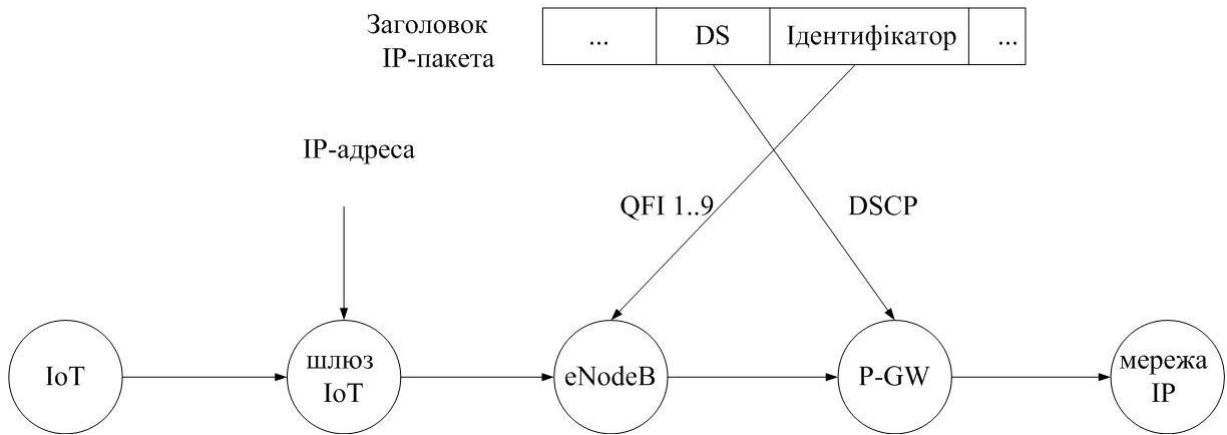


Рисунок 4.2. Порядок обслуговування IP-пакета пристрою IoT

Для вирішення вище згадуваного недоліку у роботі пропонується проводити узгоджене управління ресурсами та трафіком на рівні базової станції, ядра мережі та зовнішніх IP-орієнтованих мереж (рис.4.2). Ці правила базуються на формалізованому критерії визначення відносного пріоритету класів трафіку і враховують вимоги QoS, ймовірність використання послуг та відносний коефіцієнт значущості параметра відносно інших. За цими правилами в мережі 5G обслуговуються не всі дев'ять класів мультисервісних трафіків (див. табл.1.2), а тільки чотири класу якості для сервісів IoT (табл.4.1). Для IP-пакетів, що зазнали негативного впливу, на мережевому рівні (шлюзом P-GW) за удосконаленим алгоритмом проводити швидше обслуговування у вузлах мережі за рахунок надання вищого пріоритету обслуговування пакетам, що “спізнюються”, шляхом динамічної модифікації поля DSCP в заголовках пакету. Модель IP-вузла мережі з удосконаленим алгоритмом пріоритетного обслуговування пакетів показано на рис.4.3.

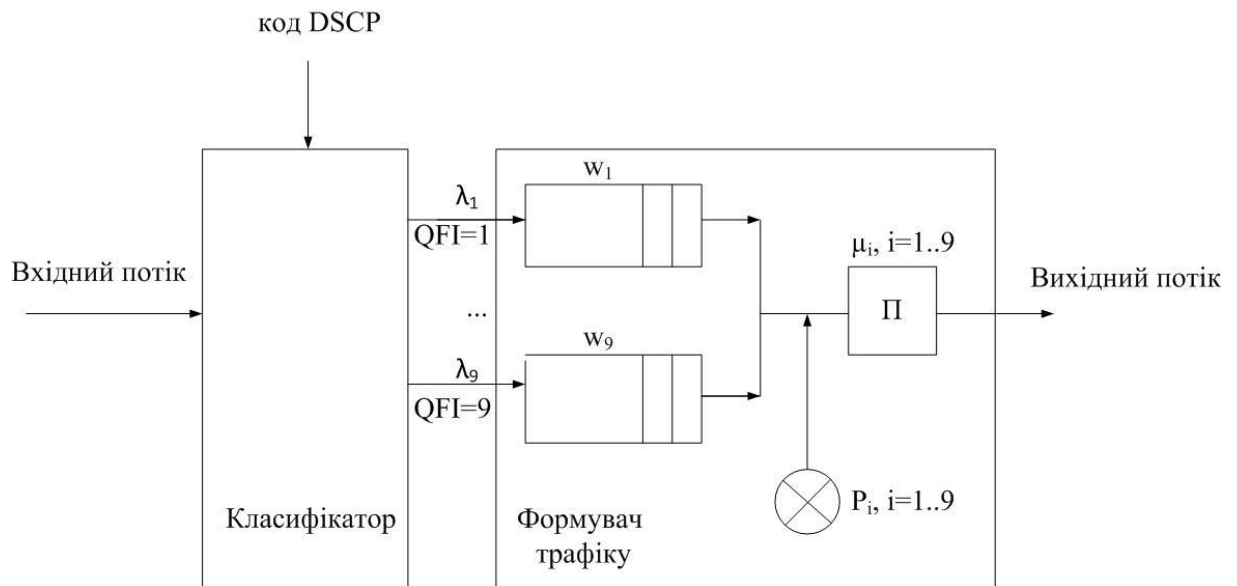


Рисунок 4.3. Обслуговування трафіків різного класу в шлюзі P-GW

Проблему виникнення високого ризику придушення менш пріоритетних потоків потоками з найвищим пріоритетом, що також є актуальним для IP-пакетів, що спізнюються, пропонується вирішити шляхом встановлення для кожного класу пріоритетності свій лічильник допустимого часу затримки пакетів, який на основі аналізу поля «Час в мережі» (рис.4.1) буде маркуватиме пакети шляхом встановлення двох зарезервованих (не використаних) останніх бітів у полі DSCP та обслуговуватиме їх в залежності від встановленої кодової комбінації. Таким чином, перед кожним запитом до буферів $\overline{w_1, w_9}$ за черговим пакетом на обслуговування формувач трафіку проглядає всі черги та для пакетів, час затримки яких досягнув якогось критичного рівня, здійснює їх підвищення пріоритету обслуговування. З метою управління пріоритетністю обслуговування IP-пакетів пропонується в колі DS динамічно встановлювати різні комбінації бітів як для зберігання класу пріоритетності IP-пакетів (L1-L4), так і для значення параметра QFI. Для кодування чотирьох класів достатньо двох бітів в полі заголовка IP-пакету, а для кодування дев'яти значень параметра QFI достатньо чотирьох бітів в полі заголовка IP-пакету, таким чином розрядності поля DS достатньо

для такого кодування.

Методику можна використати для розмежування черговості обробки класів трафіку мультисервісних мереж з використанням різних мережевих протоколів, які пристосовані для вказівки рівня пріоритету в заголовках пакетів. Процес визначення пріоритету можна автоматизувати за допомогою створення програмного продукту, який би виконував розрахунок значення відносного пріоритету після визначення нових значень вхідних змінних. Цей програмний продукт буде відповідати за механізм планування низхідного та висхідного каналів для IoT-пристроїв і дозволить операторам мережі 5G залишити існуючі базові станції eNodeB без змін. Програмний продукт може бути розміщений на окремому сервері, встановити біля базовій станції 5G або розгорнути у хмарі. Варіант реалізації пропозиції залежить від прогнозованої кількості підключень IoT-пристроїв.

В класифікаторі оновлюється 2 поля цього заголовку:

- поле «час в мережі»;
- поле «DS».

IP-пакет з потоку IoT від шлюзу IoT, де вже в полі «DS» заголовку IP-пакету встановлений клас обслуговування цього пакету в мережі 5G, наприклад: 00 – L1, 01 – L2, 10 – L3, 11 – L4, передається до класифікатора мережі 5G. Шлюз IoT сформував поле «час в мережі» як час, який запит від пристрою IoT затримувся в кластері IoT Кл1 (рис.2.12). Слід очікувати, що і в кластері IoT Кл2 буде однаковий приблизний час. Якщо також враховувати час на обслуговування в обох транспортних мережах ТМ1 та ТМ2 приблизно однаковими, то на обслуговування цього запиту від пристрою IoT кластеру Кл1 в мережі 5G за кожною мережею ТМ1 та ТМ2 буде:

$$t_{TM1} = t_{TM2} = t_L - 2 \cdot t_{K1}, \quad (4.1)$$

де t_{TM1} - час затримки запиту від пристрою IoT в транспортній мережі ТМ1;

t_{TM2} - час затримки запиту від пристрою IoT в транспортній мережі TM2;

t_L - максимальний час наскрізної затримки запиту від пристрою IoT з кластеру Кл1 до IoT-пристрою з кластеру Кл2 відповідно до класу обслуговування L1..L4 (табл.4.1);

t_{Kl1} - час затримки запиту від пристрою IoT в кластері Кл1.

Наприклад, запит від IoT-пристрою з класом обслуговування L3, який вже затримався в кластері IoT на час 50 мс, може бути затриманий на обслуговуванні у оператора мережі 5G не більш 450 мс, т.к. для класу обслуговування L3 максимальний час затримки складає 1000 мс, в кластері, що передає, та в кластері, що приймає, запит затримується на 100 мс, остаточний час ділиться між мережею 5G, що передає запит, та мережею 5G, що приймає його.

Основне призначення класифікатора за рис.4.3 – агрегація потоку IoT в мультисервісному потоці мережі 5G для подальшої обробки запитів від IoT за загальними принципами мережі 5G. Класифікатор, по-перше, в байт «DS» заголовку IP-паketу встановлює класу обслуговування L1..L4 відповідно до SLA за контрактом, по-друге, встановлює пріоритет QFI для цього IP-паketу за правилами:

- для класу обслуговування L4 призначити QFI=9 (найнижчий з можливих за типом обслуговування NGBR);
- для класу обслуговування L3 призначити QFI=4, як максимально близький за параметрами за типом обслуговування GBR та який потім буде змінюватися за алгоритмом, який буде наданий нижче;
- для класу обслуговування L2 призначити QFI=1, як максимально близький за параметрами за типом обслуговування GBR та який потім буде змінюватися за алгоритмом, який буде наданий нижче;
- для класу обслуговування L1 призначити QFI=3 як максимально можливий за типом обслуговування GBR;

а, в третьому, на основі значення поля «час в мережі» (t_{Kl1}) та значення класу

обслуговування L1..L4 замінює значення поля «час в мережі» на обчислене значення t_{TM1} . В подальшому в формуваче черги мережі 5G буде контролюватися значення «час в мережі» та здійснюватися дії, щоб поточний час обслуговування в мережі не перевищив цього значення поля.

В подальшому IP-пакети від IoT-пристроїв в мережі 5G обробляються однаково з іншими мультисервісними пакетами.

Таким чином, байт DS заголовку IP-пакету складає (рис.4.4):

XXXXXXXXYY,

Рисунок 4.4. Структура байту DS заголовку IP-пакету, де XXXXXX – пріоритет QFI IP-пакету, YY – клас обслуговування IoT-пристрою

Алгоритм формувача трафіку щодо керування обслуговування IoT-пристроїв в гетерогенній мобільній мережі стандарту 5G може бути наступним.

Для класу L1. Для організації обміну даними між IoT-пристроями будь-яких класів та базовій станцією остання повинна виділити ресурси у вигляді так званих «ресурсних блоків» в необхідній кількості. Від IoT-пристрою поступає запит на обслуговування до базовій станції. Базова станція аналізує пріоритет IoT-пристрою, з якого відбувся запит, та визначає, що пріоритет найвищий (L1). Далі базова станція аналізує чергу та мережеві ресурси, які потрібні для передачі даних. Якщо ресурсів достатньо, то базова станція інформує IoT-пристрій про виділені ресурси. Здійснюється обмін даними між базовою станцією та IoT-пристроєм. Коли IoT-пристрій завершить передачу, то базова станція здійснити зберігання статистичних даних по цієї транзакції для подальшого аналізу та прогнозування активності цього IoT-пристрою. Якщо IoT-шлюз накопив ще даних з цього IoT-пристрою, то знову здійснюється передача даних, якщо – ні, то вивільняються ресурси цього IoT-пристрою. Якщо базова станція після аналізу чергу визначає, що мережевих

ресурсів, які потрібні для передачі даних IoT-пристроєм з класом обслуговування L1 не вистачає, то перевіряється можливість вивільнення ресурсів IoT-пристроїв класу L3. Якщо для IoT-пристроїв з класом L1 немає вільних ресурсів, то базова станція виділяє необхідні ресурси за рахунок реорганізації черги і затримки передачі для IoT-пристроїв класу L3. В іншому випадку запит відхиляється, і алгоритм завершується.

Для класу L2. Аналогічно, як раніше, базова станція очікує від IoT-пристрою запит на обслуговування. Всі оброблені запити зберігаються у вигляді черги відповідно до їх пріоритету. Також базова станція перевіряє наявність ресурсів для здійснення передачі від IoT-пристроїв класу обслуговування L2. Якщо ресурсів достатньо, то виконується алгоритм для класу L1. Якщо ресурсів не достатньо, то визначається затримка для класу обслуговування L2. Базова станція перевіряє наявність ресурсів в межах допустимої затримки для даного класу обслуговування. Якщо ресурсів достатньо і є можливість розподілу ресурсів в межах допустимої затримки, то запит від IoT-пристрою класу обслуговування L2 ставиться в чергу, та виконується алгоритм для IoT-пристроїв класу обслуговування L1. Якщо – ні, то перевіряється можливість вивільнити ресурси для пристроїв класу L3. Якщо це можливо, то IoT-пристрої класу L3 затримуються, та черга переупорядковується. В іншому випадку IoT-пристрій класу L2 здійснює обмін даними. Коли IoT-пристрій завершить передачу, то базова станція здійснити зберігання статистичних даних по цієї транзакції для подальшого аналізу та прогнозування активності цього IoT-пристрою.

Для класу L3. Початок аналогічний попереднім. Базова станція визначає, що запит здійснив IoT-пристрій класу обслуговування L3. Виконується аналіз черги та наявність мережевих ресурсів для передачі даних. Якщо ресурсів достатньо, то про це базова станція повідомляє IoT-пристрою. Коли IoT-пристрій завершить передачу, то базова станція здійснити зберігання статистичних даних по цієї транзакції для подальшого аналізу та прогнозування активності цього IoT-пристрою. Якщо доступних

ресурсів не достатньо, то аналізується черга, і ресурс виділяється негайно.

Для класу L4. Початок аналогічний попереднім. Базова станція визначає, що запит здійснив IoT-пристрій класу обслуговування L4. Виконується аналіз черги та наявність мережевих ресурсів для передачі даних. Якщо знайдено доступні ресурси, то IoT-пристрій класу L4 здійснює обмін даними. Коли IoT-пристрій завершить передачу, то базова станція здійснити зберігання статистичних даних по цій транзакції для подальшого аналізу та прогнозування активності цього IoT-пристрою. Якщо доступних ресурсів не достатньо, то передача даних не відбувається. Базова станція формує IoT-пристрою класу обслуговування L4 відмову в обслуговуванні та робиться запис про невдалу передачу. Таким чином алгоритм закінчується.

Для всіх чотирьох випадків дії IoT-пристрою однакові. Коли IoT-пристрій «прокидається», він зчитує необхідну інформацію зі свого датчику, створює відповідне повідомлення та надсилає до eNodeB запит на обслуговування. Цей запит повинний містити розмір повідомлення, параметри радіосигналу та ін. Цей запит надається через IoT-шлюз, який аналізує запит та планує для базовій станції розмір необхідних ресурсів для здійснення транзакції. Транзакція здійснюється після повідомлення від базовій станції про готовність для цієї транзакції. IoT-шлюз відповідно до визначеного за договором SLA встановлює для запитів пріоритети, надсилає запити до базовій станції, зберігає їх та фільтрує.

За допомогою формувача черги мережі 5G запити від IoT-пристроїв обслуговуються на загальних правилах обробки мультисервісних потоків мережі та відповідно до призначених класів та пріоритетів, де:

- для запитів класу L4 встановлений мінімальний пріоритет QFI=9 не змінюється ніколи;
- для запитів класу L3 клас може збільшуватися до L2, а потім до L1, при цьому призначений пріоритет QFI=4 змінюється на QFI=2, потім на QFI=1, потім на QFI=3;
- для запитів класу L2 клас може збільшуватися до L1, при цьому

призначений пріоритет $QFI=1$ змінюється на $QFI=3$;

- для класу обслуговування L1 призначений максимальний пріоритет $QFI=3$ не змінюється ніколи.

Підвищення пріоритету запитів необхідно, щоб забезпечити наскрізну якість обслуговування від IoT, що передає, до IoT, що приймає, через мережу 5G. Зміна пріоритетів здійснюється формувачем черги на основі аналізу поля «Час в мережі» заголовку IP-паketу та зрівняння його значення з допустимим значенням для відповідного класу обслуговування. Така дія спроможна контролювати такий параметр якості обслуговування як час затримки та гарантувати наскрізне його значення.

Момент зміни класу обслуговування та відповідного параметру обслуговування змінюється в невизначений час, т.к. немає чіткого співвідношення між класами якості L1..L4 та параметром пріоритету QFI , наприклад, найкращий клас обслуговування пристроїв IoT L1 означає транзакції з максимальним часом затримки 10 мс та вірогідністю втрати пакетів на рівні 0,0001, а найкращий пріоритет обслуговування в мережі 5G ($QFI=3$) означає транзакції з максимальним часом затримки 50 мс та вірогідністю втрати пакетів на рівні 0,001, тобто немає чіткої відповідності між цими двома класами обслуговування. Вибір моменту зміни класу обслуговування та відповідного пріоритету для запитів IoT у кожній черзі (за кожним QFI) можливо визначити методом нечітких множин.

Нехай

$$QFI = \{QFI_1, QFI_2, QFI_3, QFI_4\} \quad (4.2)$$

- універсальна множина показників якості обслуговування в мережі 5G, де $QFI_1..QFI_4$ – її елементи. Q – підмножина універсальної множини QFI , елементи якої задовольняють параметру максимальної затримки на обслуговуванні в мережі 5G відповідно до свого пріоритету. Підмножина Q визначається як множина упорядкованих пар

$$Q = \{ \mu_Q(QFI_i) / \leq t_{затр.макс i} \}, \quad (4.3)$$

де QFI_i - показник якості обслуговування (див. табл.1.2) за пріоритетом i ;

$t_{затр.макс i}$ - максимальний час затримки пакету з пріоритетом i на обслуговуванні в мережі 5G (див. табл.1.2);

i - значення пріоритету обслуговування за табл.1.2, $i = \overline{1,4}$;

$\mu_Q(QFI_i)$ - характеристична функція приналежності, яка приймає будь-яке значення від 0 до 1, де $\mu_Q(QFI_i) = 1$, якщо $t_{затр.макс} = t_{затр.макс i}$, та $\mu_Q(QFI_i) < 1$ - в протилежному випадку.

В загальному випадку функції приналежності для $i = \overline{1,4}$ мають наступний вигляд (рис.4.5), де показано, що для якогось моменту часу $t_{затр}$ (виділене червоним кольором) однозначно визначити, за яким пріоритетом в подальшому обслуговувати прийнятий IP-пакет, не можливо, оскільки таке значення $t_{затр}$ можливо для всіх випадках пріоритету, але за різними ступенями належності.

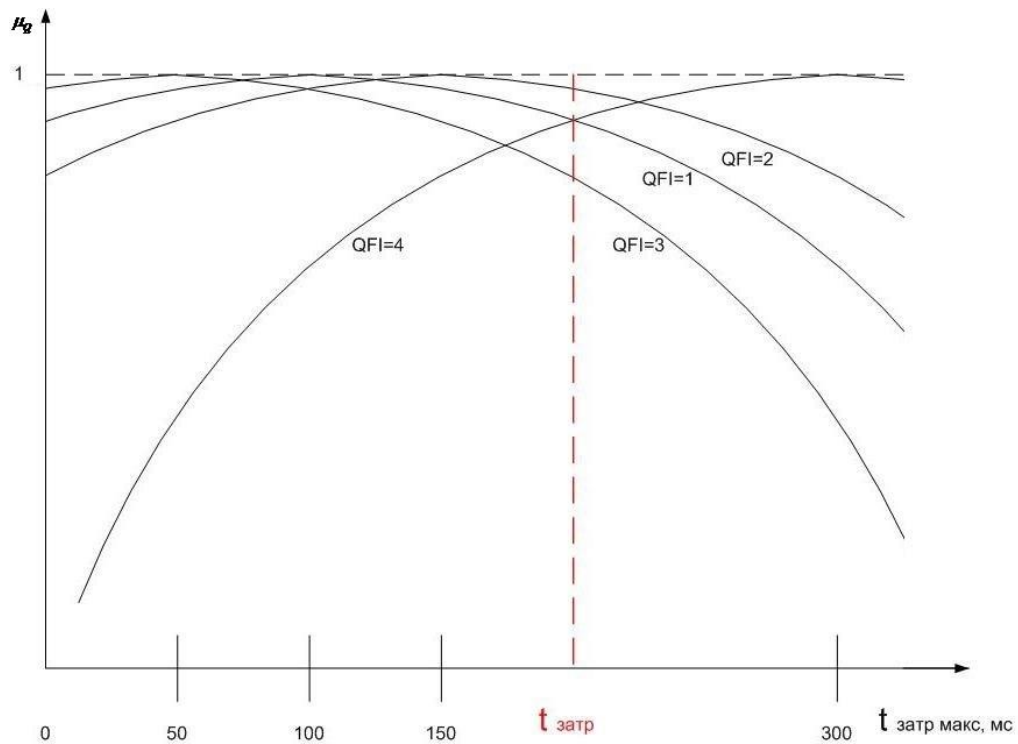


Рисунок 4.5. Функції приналежності для пріоритетів QFI1..QFI4

Для розрахунку фактичних значень параметру затримки, при якому потрібно змінювати пріоритет, для кожного поточного пріоритету необхідно перейти від нечіткої підмножини Q до чіткої множини

$$t_{\text{затр макс}} = \{t_{\text{затр макс } 1}, t_{\text{затр макс } 2}, t_{\text{затр макс } 3}\}, \quad (4.4)$$

де $t_{\text{затр макс } 1}$ - значення часу затримки, при якому потрібно змінювання пріоритету з QFI1 на QFI3;

$t_{\text{затр макс } 2}$ - значення часу затримки, при якому потрібно змінювання пріоритету з QFI2 на QFI1;

$t_{\text{затр макс } 3}$ - значення часу затримки, при якому потрібно змінювання пріоритету з QFI4 на QFI2.

Зміна пріоритетів здійснюється тільки для IP-пакетів IoT класів обслуговування L2 та L3, оскільки пріоритети класів L1 та L4 зміни не підлягають. В загальному випадку нечітку підмножину Q можна розглядати як звичайну або чітку множину $t_{\text{затр макс}}$, якщо $\mu_Q(QFI_i) = \{0,1\}$, але таких

значень для всіх пріоритетів немає. Чітка множина $t_{затр.макс}$, найближча до нечіткої множини Q , може бути визначена у випадку, якщо

$$t_{затр.макс} = \left\{ \begin{array}{l} t_{затр.макс\ 1} / \mu(QFI_1) = \mu(QFI_3), t_{затр.макс\ 2} / \\ \mu(QFI_2) = \mu(QFI_1), t_{затр.макс\ 3} / \mu(QFI_4) = \mu(QFI_2) \end{array} \right\} \quad (4.5)$$

та зображена графічно (рис.4.6).

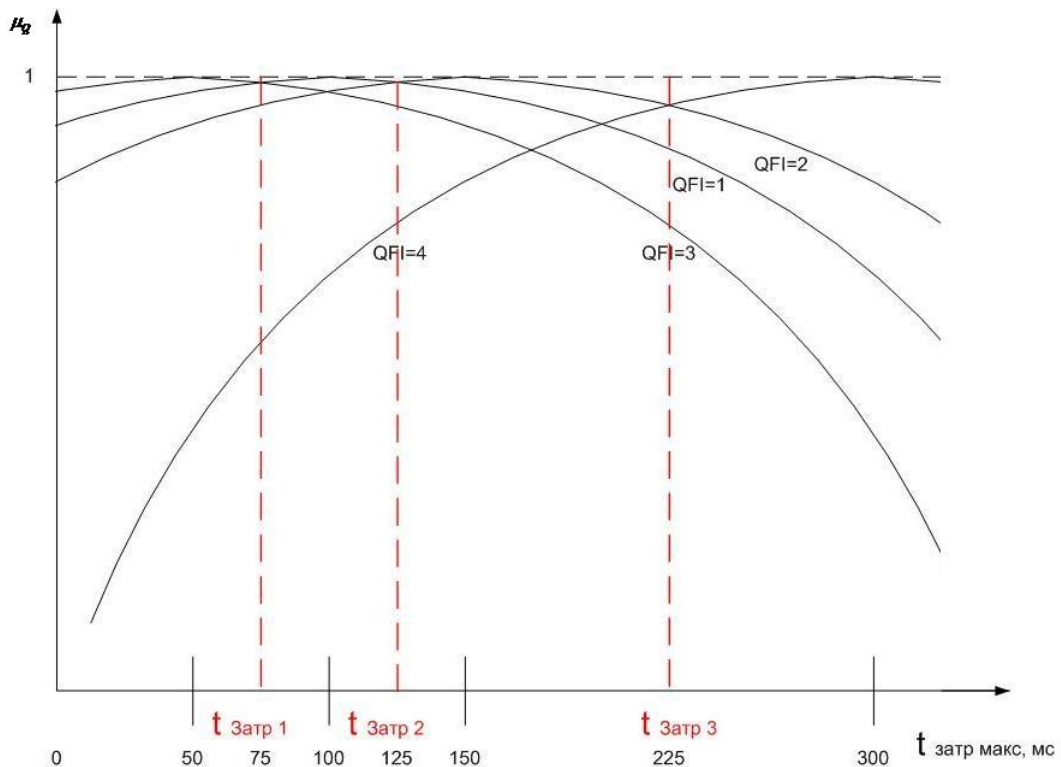


Рисунок 4.6. Функції належності для класів обслуговування L2 та L3

Елементи нечіткої множини $\mu_Q(t_{затр.макс})$, для яких виконується умови (4.5), є точками переходу цієї нечіткої множини та є моментами часу зміни пріоритетів обслуговування пакетів. Згідно до рис.4.6 зміна пріоритетів для IP-пакетів IoT запитів в мережі 5G для якісного їх обслуговування повинна здійснюватися в моменти часу загальної затримки пакету в 75, 125 та 225 мс відповідно до пріоритетів.

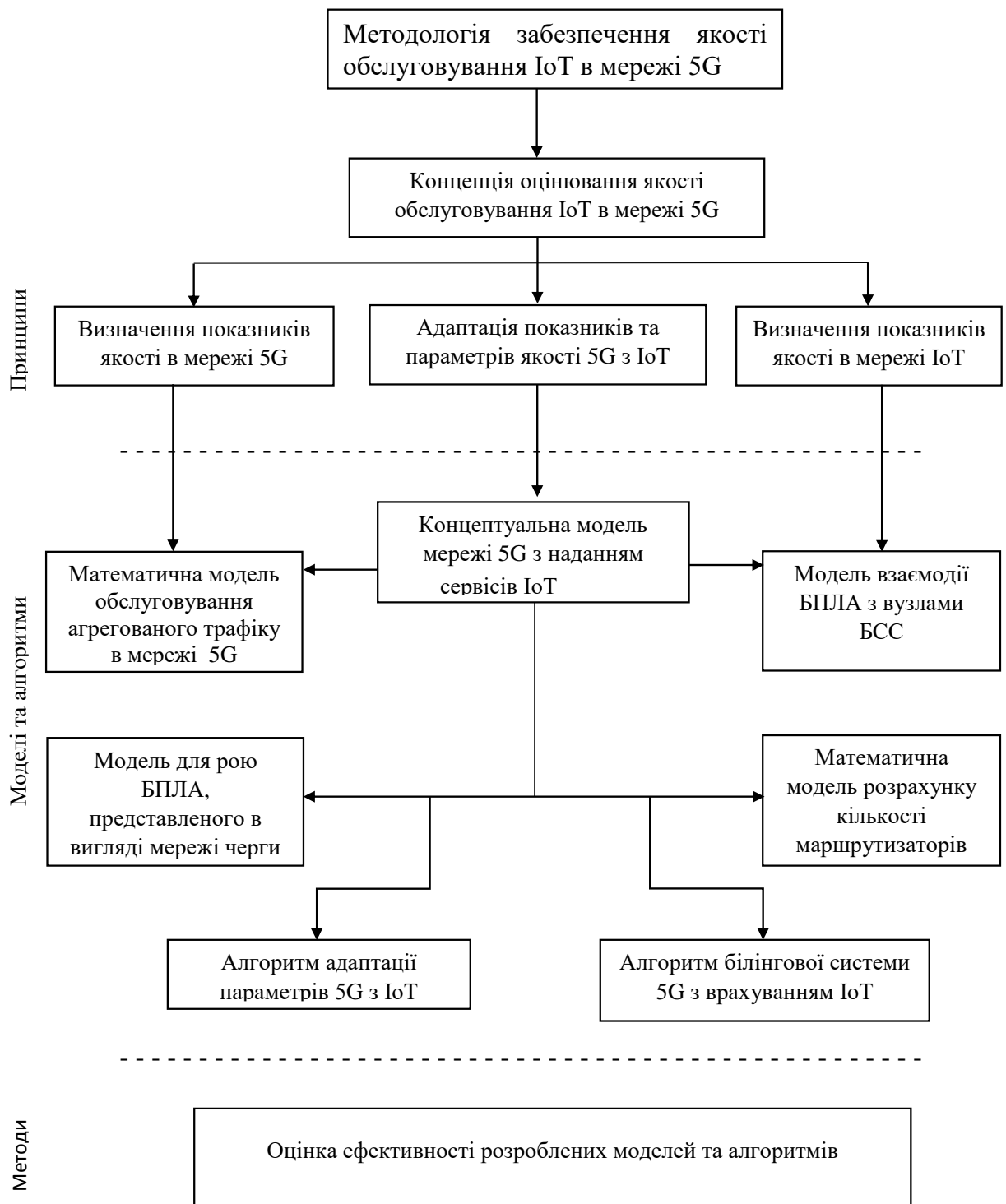


Рисунок 4.7. Методологія забезпечення якості обслуговування IoT в мережі 5G

4.7. Висновки за розділом 4

1. Розроблена методологія обслуговування IP-пакетів від пристроїв IoT забезпечує максимально ефективно надання їм сервісів та включає зміст та алгоритми управління трафіком від пристроїв IoT в мережі стандарту 5G, що дозволяє збільшити якість їх обслуговування.
2. Розглянутий філософський рівень методології надання якісних сервісів IoT в мережі 5G, в основі якого лежить діалектичний принцип, який дозволяє розвинути адаптацію структури мережі IoT під вимоги мережі 5G шляхом адаптації параметрів якості обслуговування мережі 5G під вимоги мережі IoT.
3. Розглянути загальнонаукові принципи і підходи щодо надання якісних сервісів IoT в мережі 5G, які широко поширені в сучасній науці, що дозволяє базуватися на формалізованому критерії визначення відносного пріоритету класів трафіку і врахувати вимоги QoS, ймовірність використання послуг та відносний коефіцієнт значущості параметра відносно інших.
4. Розглянута конкретна наукова методологія в галузі інформаційних наук, а саме застосування алгоритму пріоритетного обслуговування, що дозволяє проводити узгоджене управління ресурсами та трафіком на рівні базової станції, ядра мережі та зовнішніх IP-орієнтованих мереж
5. Знайшла подальшого розвитку модель DiffServ шляхом введення декількох рівнів якості обслуговування IoT-пристроїв та декількох відповідних пріоритетів, що дозволяє обслуговувати трафік IoT-пристроїв в агрегованому потоці мережі 5G на загальних правилах.
6. Вперше розроблений алгоритм пріоритетного обслуговування пакетів агрегованого потоку в мережі 5G, в якому шляхом динамічної модифікації поля DSCP в заголовках пакету для IP-пакетів, що зазнали негативного впливу, на мережевому рівні (шлюзом P-GW) здійснюється швидше їх обслуговування у вузлах мережі, що дозволяє контролювати такий параметр якості обслуговування як час затримки IoT-пакетів та гарантувати наскрізне його значення.

РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЬ ОБЛІКУ НАДАННЯ СЕРВІСІВ ІНЕРНЕТУ РЕЧЕЙ В МЕРЕЖІ 5G

Для комплексного управління телекомунікаційними ресурсами підприємства зв'язку свого часу були створені системи управління та оперативної підтримки операторів зв'язку. Спочатку такі системи були повністю спрямовані на оперативне забезпечення телекомунікаційних мереж. Зараз такі бізнес-завдання вирішуються в рамках всього лише одного з модулів сучасної системи OSS (Operation Support System)/ BSS (Business Support System).

В цілому рішення OSS/BSS призначені для комплексної автоматизації операційної діяльності телекомунікаційних компаній в рамках бізнес-процесів, сервісів і функцій управління. Існує два типи систем:

- OSS системи відповідають за взаємодію з телекомунікаційним середовищем: телекомунікаційні мережі, комутаційна апаратура, апаратні системи зв'язку та ін. і призначені для підтримки роботи телекомунікаційних систем підприємства зв'язку;
- BSS системи забезпечують підтримку бізнес-процесів телекомунікаційних операторів, які так чи інакше закриті для взаємодії з абонентами.

Функціонал рішень OSS і BSS часто перекривається і взаємопроникає, тому на ринку існує безліч комплексних рішень. У зв'язку з цим абревіатура OSS/BSS, іноді BOSS, використовується для позначення загального ринку. Системи OSS і білінг є основою діяльності телекомунікаційних компаній. Всі можливості постачальників послуг зв'язку скоротити час запуску нових сервісів, підвищити якість їх надання, монетизувати активи безпосередньо залежать від OSS і білінгових систем. Цей розділ присвячений сучасній білінгової системі, де враховується надання сервісів IoT.

5.1. Процес білінгу

Білінгова система (БС) – це програмно-апаратний комплекс, який:

- призначений для обліку споживання послуг, управління розрахунками за ці послуги, управління самими послугами одночасно зі зберіганням інформації про абонентів, які цими послугами скористалися;
- веде облік обсягу використаних абонентами послуг, списання і розрахунок грошових коштів згідно з тарифами компанії;
- обчислює вартість послуг зв'язку для кожного клієнта і зберігають інформацію про всі тарифи і інших вартісних характеристиках, що використовуються телекомунікаційними операторами для виставлення взаєморозрахунків з постачальниками послуг і рахунків абонентам.

Найчастіше БС створюється на основі певної системи управління базами даних. Більшість БС в світі створювалося на основі СУБД Oracle. Серед інших СУБД можна зазначити Sybase і Informix, як розраховані на великі обсяги інформації. Відомі такі білінгові системи: Bill-2000-prepaid, Flagship, BIS, CBOSS, Arbor.

Процес білінгу складається із сукупності декількох основних технологічних функцій, які можуть змінюватися, проводитися в сукупності, йти в різній послідовності:

- виставлення рахунку та отримання оплати;
- фіксування наданої послуги;
- її тарифікація;
- обробка тарифікованих послуг.

Суттєве місце в процесі білінгу займають розрахунки оператора з іншими суб'єктами, які беруть участь в той чи інший спосіб в наданні послуги або у взаєморозрахунках між оператором і кінцевим користувачем. Процес взаємодії оператора з продавцями послуг та кінцевими користувачами заснований на генерації звітів за наданими послугами і виставленні рахунків. Процес взаємодії оператора з іншими операторами, які

надають послуги даному оператору або отримують їх від нього, проводиться за допомогою порівняння результатів звітів і білінгу в цілому у кожного з них. Цей процес має назву крос-білінгу. Разом з цим, зазвичай оператор, який надає послуги, виставляє рахунок або направляє звіт, а оператор, який одержує послуги, проводить крос-білінг.

Існує кілька назв білінгової системи:

- АСР - автоматизована система розрахунків;
- IBS - інформаційна білінгова система.

БС повинна володіти певним набором якостей:

- гнучкість – одна з важливих якостей БС, тобто здатність пристосовуватися до обставин, що змінилися. Гнучка система адаптована не тільки під короткострокові потреби оператора. Завдяки таким якостям, як настроюваність, модульність і відкритість, вона дозволяє вирішувати перспективні завдання. Чим більше параметрів налаштування має система, тим краще;
- модульність. Модульний принцип побудови системи - це принцип, при якому вся система збирається з окремих частин (модулів - підсистем), наприклад, підсистему попередньої обробки даних, підсистему оперативного управління рахунками, підсистему оповіщення клієнтів та ін.;
- відкритість системи означає відкритість вихідного коду програмного продукту, що дозволяє оператору в майбутньому не залежати від розробника і самостійно підтримувати і модернізувати систему;
- масштабованість по навантаженню. З ростом абонентської бази, появою додаткових послуг не повинно бути необхідності змінювати або допрацьовувати програмну частину БС. Підвищення можливостей БС має досягатися за рахунок модернізації апаратних засобів системи. При проектуванні БС необхідно використовувати системи управління базами даних (БД), які розраховані на великі обсяги даних та повинні бути сумісні з різними комп'ютерними платформами для підтримки багатопроцесорної роботи;

- надійність БС визначається надійністю системи управління базами даних і технологіями, що застосовуються при розробці системи, та забезпечується дотриманням певних стандартів при їх розробці;
- багатомовність — можливість встановлювати різні мови для обробки інформації;
- мультивалютність — можливість розрахунків з будь-якою валютою;
- гаряча тарифікація – зміна балансу рахунку користувача відбувається відразу після наданої послуги, а інформацію про залишок за рахунком можна отримати відразу після наданої послуги та ін.

БС створюється і налаштовується під бізнес-процес певного оператора зв'язку, має власний набір функцій, відповідних технологічному циклу надання послуг, і може працювати з конкретним мережевим обладнанням, що постачає їй інформацію про запити і з'єднання. але є і стандартний набір функцій, підтримуваних практично всіма БС. У нього входять:

- операції, які використовуються для роботи по виконанню наступних процедур аналізу вхідних даних, наприклад, функція отримання даних про підключення та послуги;
- операції з управління мережевим обладнанням: активація/деактивація (блокування/розблокування) абонентів та команди зміни умов підписки абонентів, що передаються безпосередньо на комутатор;
- основні функції додатку системи управління базою даних, в тому числі: тарифікація комутаторних записів про дзвінки та послуги, формування та редагування таблиць бази даних розрахункової системи, виставлення рахунків і їх друк, кредитний контроль рахунків, звітність, резервне копіювання та ін.

Основними підсистемами БС є:

- попередньої обробки даних про з'єднання;
- оперативного управління білінгом;
- оповіщення клієнта.

Білінгові системи є стандартизованими за трьома групами:

- американський стандарт ANSI 124 щодо індивідуальної відповідності між бізнес-процесами операторів телекомунікацій і інформацією, що передається в ході обміну даними між комутаторами;
- північноамериканський стандарт білінгу CIBER щодо стільникових мереж стандарту AMPS;
- європейський (за походженням) стандарт TAP.

Таким чином, білінгова система - це бухгалтерська облікова система з програмно-апаратним забезпеченням, яке спеціально розроблена для операторів зв'язку.

5.2. Білінгова система для IP-телефонії

Корпоративна інформаційна система компанії, яка надає регулярні які надають безліч послуги, передусім, інформаційні (платні довідки, доступ до мережі Інтернет ...) та телекомунікаційні послуги (стаціонарний і мобільний зв'язок, провідне мовлення, IP-телефонія, пейджинг). Фундаментом для інформаційних систем таких компаній є автоматизація основного технологічного процесу надання такої послуги, а саме: укладання договорів з клієнтами, реалізація послуг, розрахунки зі споживачами, облік реалізації послуг та платежів за сторонні послуги і т. і. Чим більшу кількість послуг надає компанія, чим більше клієнтів вона має, тим важливішим для роботи цього підприємства є білінг.

Білінг – це поняття, що містить:

- «accounting» – «підрахунок»: збирання інформації про надані послуги;
- «charging» – «розрахунок ціни»: тарифікація наданих послуг;

– апаратні засоби, які задіяні в організації білінга.

Білінгові системи реалізують класичну білінгову функціональність, а саме забезпечують облік:

– реалізації послуг;

– розрахунків з клієнтами та іншими постачальниками послуг.

Робочий екран оператора типовий білінгової системи представлений на рис.5.1.

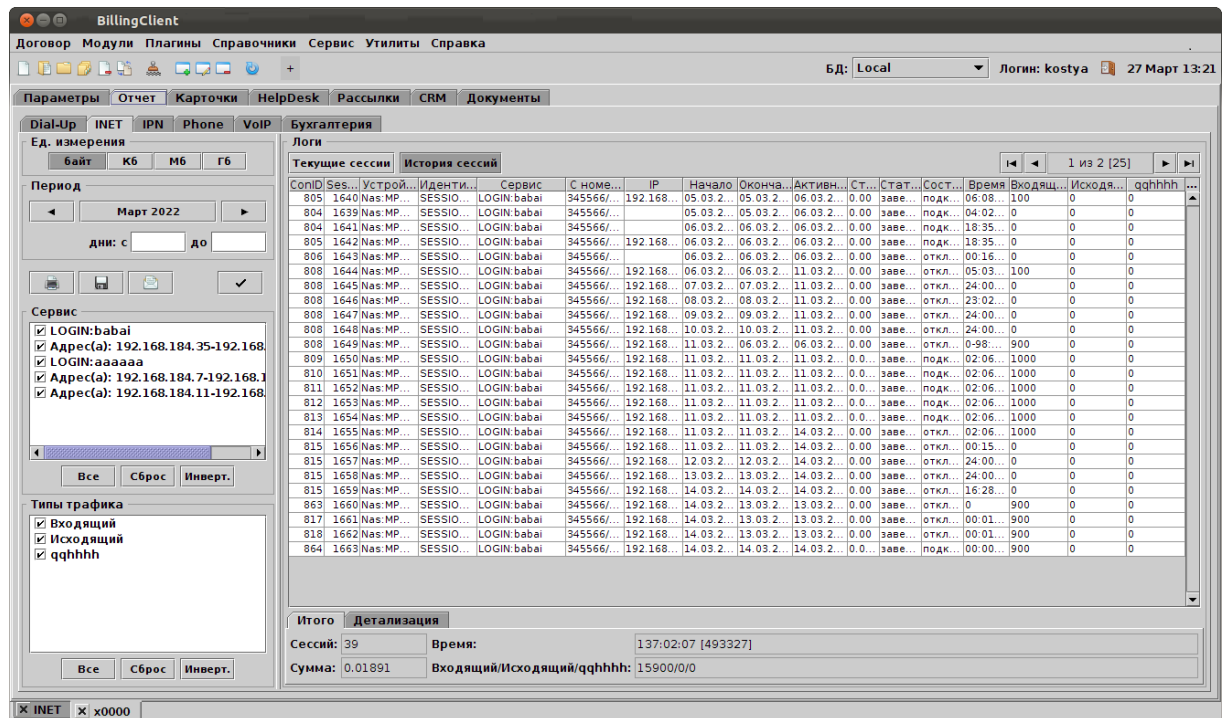


Рисунок 5.1. Робочий екран оператора білінгової системи в режимі звітування

Без автоматизації цих функцій надання будь-яких послуг на комерційній основі взагалі неможливе. Крім цих двох основних функцій, сучасна білінгова система повинна містити й інші модулі, що значно розширюють її функціональність:

– модуль бухгалтерського і податкового обліку (зокрема, видача і облік юридичним особам рахунків, актів та податкових накладних та розрахунки за податок на додану вартість);

– модуль технічного обліку (зокрема, реєстрація технічних засобів і

ресурсів підприємства, якими користується той чи інший конкретний клієнт);

– модуль оперативного моніторингу послуг;

– юридична підсистема (зокрема, здійснення претензійної роботи для боротьби із боржниками);

– аналітична підсистема та інші.

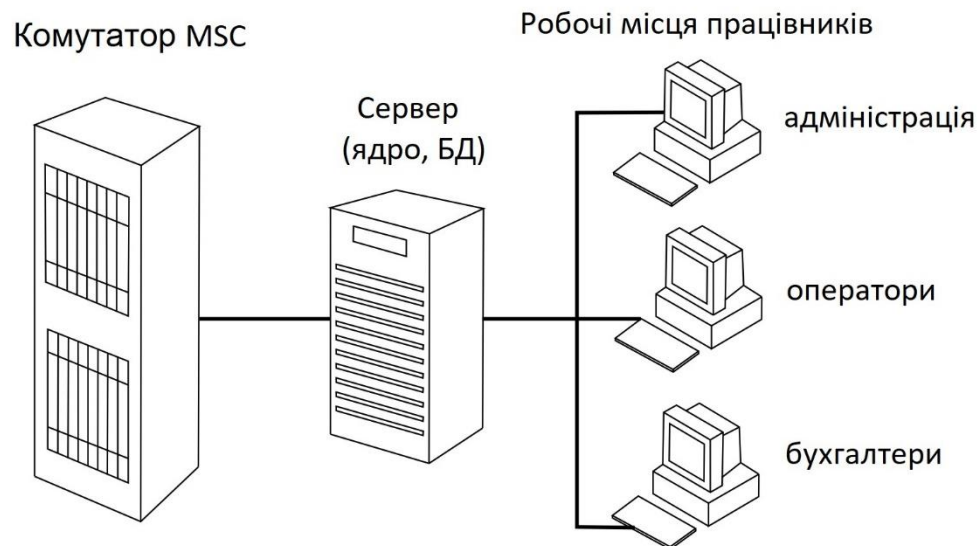


Рисунок 5.2. Підключення білінгової системи

Будь-яка білінгова система створюється і налаштовується під бізнес-процес певного оператора зв'язку, має власний набір функцій, відповідних технологічному циклу надання послуг і може працювати з конкретним мережевим обладнанням, яке постачає йому інформацію про дзвінки і з'єднання, тобто не є стандартною. Але є і стандартний набір функцій, які підтримуваних практично всіма білінговими системами, саме:

- операції, що виконуються на етапі попередньої обробки та аналізу вихідної інформації, наприклад, функція отримання даних про з'єднання і послуги (запити на комутатор);

- операції з управління мережевим обладнанням: активація/деактивація (блокування/розблокування) функцій абонентів і команди зміни умов абонентської підписки, що передаються безпосередньо комутатору;

- основні функції додатку системи управління базою даних, серед яких: тарифікація комутаторних записів на дзвінки та послуги; формування та редагування таблиць баз даних розрахункової системи; виставлення рахунків, їх друк; кредитний контроль рахунків, звітність, резервне копіювання.

В мережі 5G білінгова система підключається наступним чином (рис.5.2).

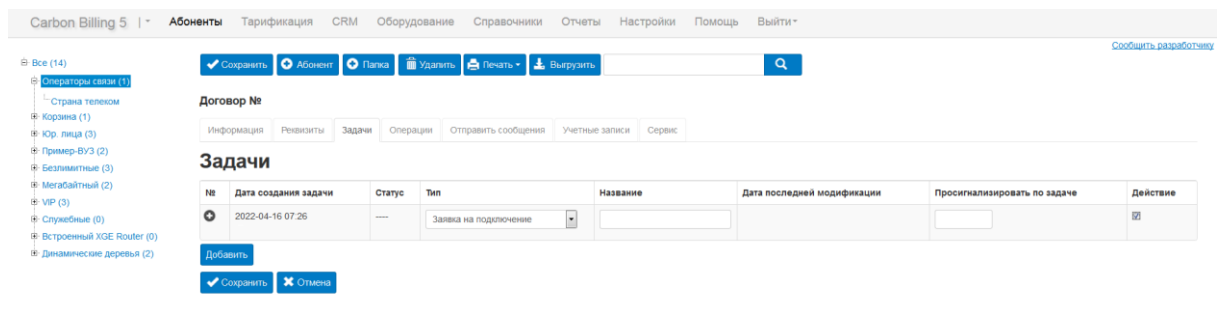


Рисунок 5.3. Экран оператора білінгової підсистеми попередньої обробки

Підсистема попередньої обробки даних аналізує початкову інформацію про з'єднання, визначає клас послуги, що надається, і параметри трафіку (напрямок виклику, джерело, зони розташування, умови роумінгу) (див. рис.5.3). Однією з найскладніших процедур цієї підсистеми є підтримка роумінгу, оскільки потрібно конвертувати записи роумінгу різних форматів з різних комутаторів та з урахуванням різних стандартів передачі інформації в каналі зв'язку, різних білінгових систем в формат запису, який використовується цією БС. Програма обробляє всі записи з'єднань між операторами та створює сервісні таблиці, які використовуються іншими підсистемами для здійснення розрахунків з абонентами, взаєморозрахунків операторів зв'язку та формування звітів. Сучасні БС дозволяють обробляти різні телекомунікаційні послуги, забезпечуючи зручне виставлення рахунків (один клієнт - один баланс - один рахунок). Це досягається за рахунок використання «інтелектуальних систем» для попередньої обробки вихідної

інформації про з'єднаннях, трафіку і сервісах, які виконують виставлення рахунків незалежно від типу зв'язку.

Підсистема оперативного управління білінгом дає можливість автоматично або через оператора білінгової системи змінити умови підписки абонентів на комутаторі, тобто заблокувати зв'язок конкретного абонента або зняти це блокування, включити або скасувати послугу.

Підсистема оповіщення клієнта оповіщає його за допомогою голосових або електронних повідомлень. Дана підсистема бере інформацію для відправки повідомлень і оголошень з таблиць баз даних.

В загальному вигляді білінгова система має наступну структуру (рис.5.4).

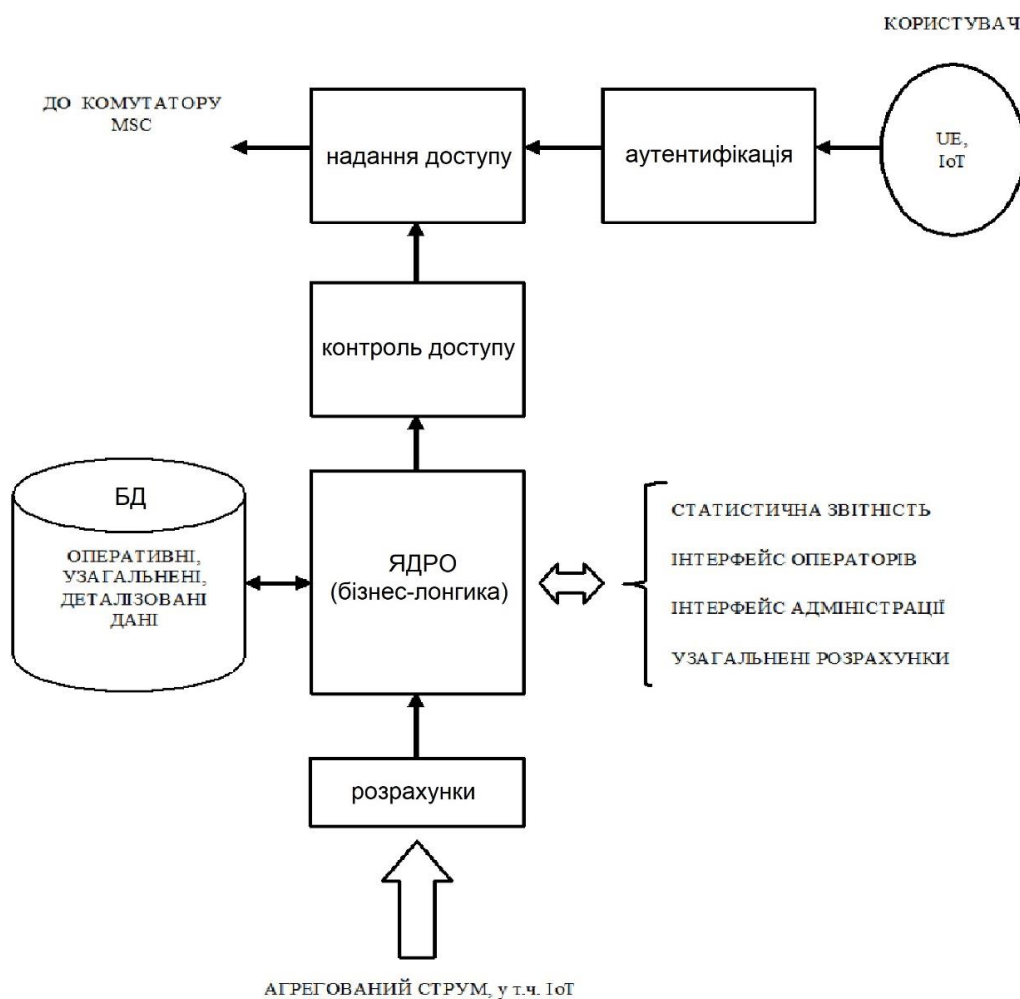


Рисунок 5.4. Структура білінгової системи

5.3. Алгоритм білінгової системи мережі 5G з наданням сервісів IoT

На рис.5.5 представлений алгоритм білінгової системи, яка спроможна обслуговувати пристрої IoT, які підключені до мобільної мережі 5G.

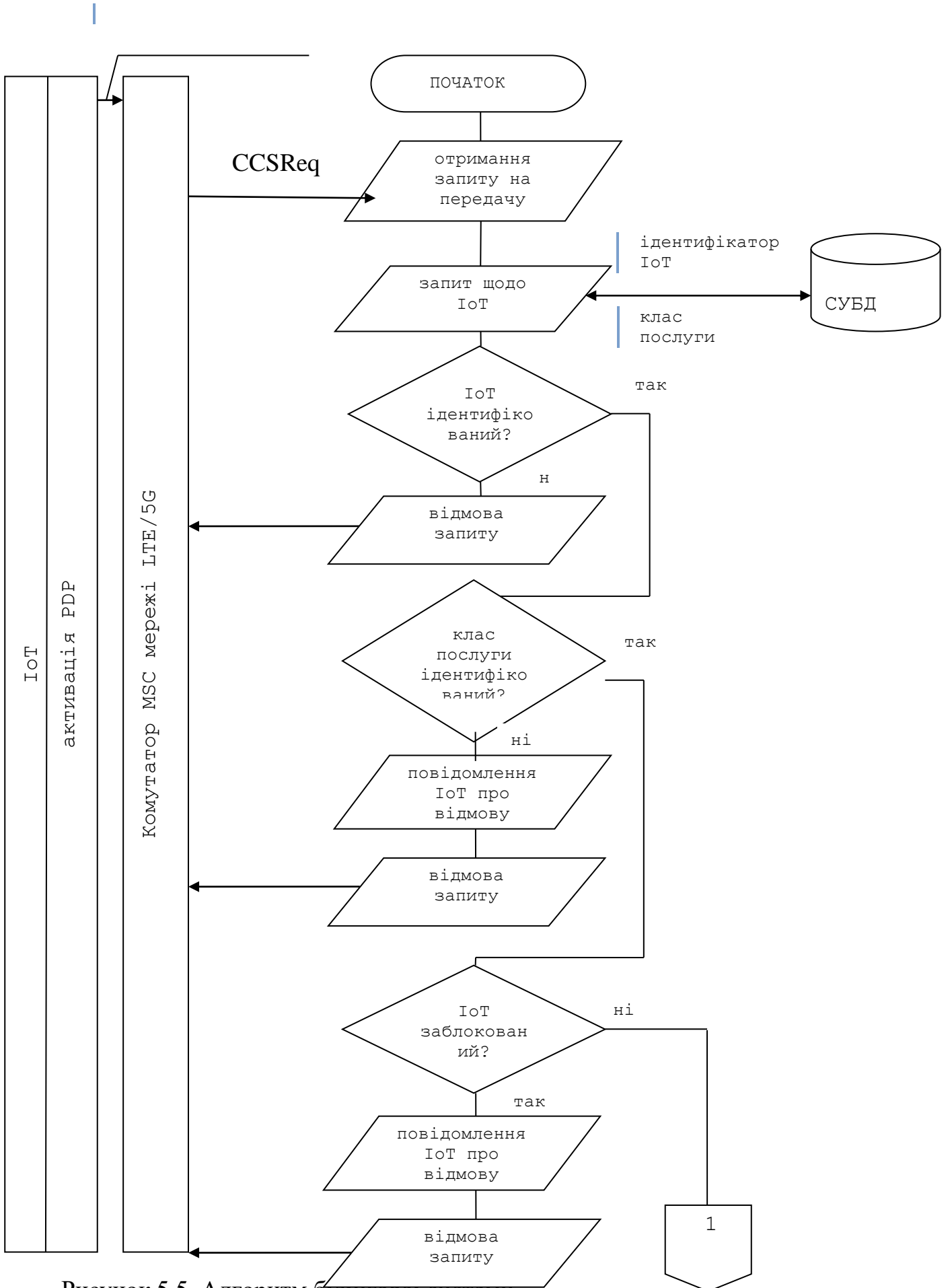


Рисунок 5.5. Алгоритм білінгової системи

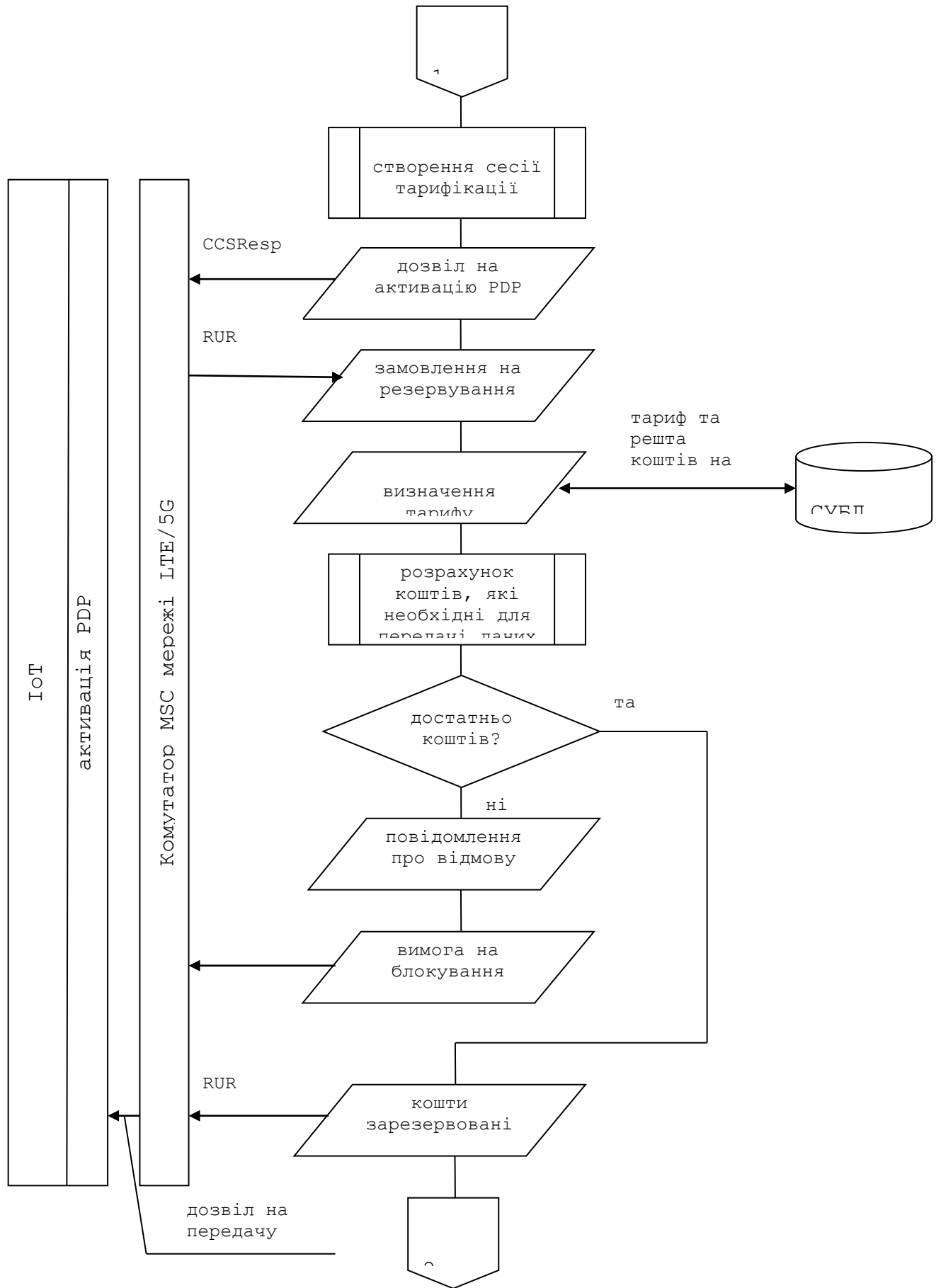


Рисунок 5.5 (подовження). Алгоритм білінгової системи

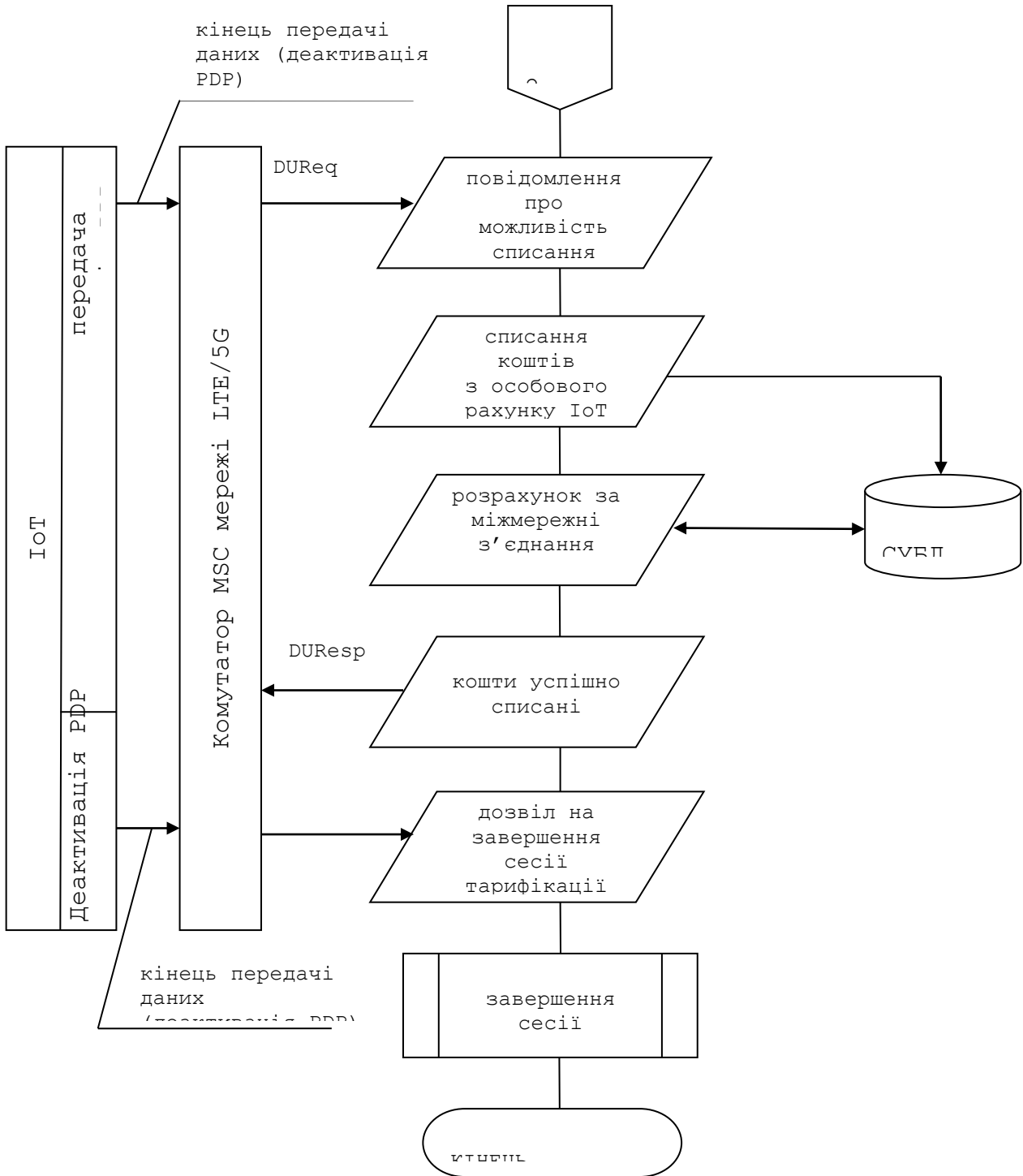


Рисунок 5.5 (подовження). Алгоритм білінгової системи

Схема тарифікації не складна: інформація про активацію IoT та тривалість його активності фіксується комутатором MSC і після попередньої обробки передається в систему розрахунку. Система розрахунків зберігає

тарифи IoT. Вона ідентифікує транзакцію і виконує необхідні розрахунки, тим самим формує рахунок користувача IoT. Очевидно, що пам'ять системи повинна зберігати не тільки стандарти, тарифи та інформацію про послуги, а й дані про користувачів, укладені договори з ними і сторонніми постачальниками послуг зв'язку (якщо такі є), а також про вартість передачі даних IoT за різними каналами і напрямками (система також повинна передбачати наявність дилерів: у них можуть бути і інші тарифи, наприклад, для підключення). Крім того, БС повинна мати базу даних, в якій зберігається історія платежів: тільки ця інформація дозволяє контролювати процес оплати і автоматизувати так звану активацію / деактивацію користувачів IoT.

Недоліком типових алгоритмів білінгових систем є те, що вони не враховують таку особливість трафіку IoT як малий трафік, коли передається всього декілька байтів даних, обробка якого йде за загальним алгоритмом, час виконання якого перебільшує час самої транзакції IoT. Якщо ввести таке поняття як «одиниця обміну інформації», де одиницею може бути як блок інформації визначеного розміру, так і кількість таких блоків, що буде відповідати одній транзакції та значно спростити алгоритм білінгу такого користувача. Якщо для малого трафіку замість підрахунку часу передачі даних використовувати підрахунок тільки кількості транзакцій, то це дозволить використовувати білінгові системи для тарифікації обслуговування IoT як з великим, так і з малим трафіком

Запропонований алгоритм білінгової системи дозволить забезпечити автоматизований облік і розрахунок вартості наданих послуг за обслуговування мережі IoT, облік даних про користувачів, що отримують ці послуги, виставлення користувачам рахунків, податкових накладних, облік нарахувань та сплат за кожним користувачем, виявлення і облік боржників та виставлення їм претензій, облік технічних засобів IoT та ін.

У Додатку Б надані фрагменти програмного забезпечення білінгової системи для обліку надання сервісів IoT.

5.4. Тарифікація послуг в мережі 5G з наданням сервісів IoT

Тарифікація послуги за запропонованим алгоритмом білінгової системи здійснюється наступним чином:

1. При спробі активувати PDP Context (отримання IP-адреси IoT в мережі мобільного оператора) GGSN (реально комутатор MSC) запитує білінгову систему чи може цей IoT активувати розрахункову сесію (CreateChargingSessionReq).
2. Якщо IoT має ідентифікацію у цього оператора (абонент знаходиться в базі даних, кошти доступні), платформа створює білінгову сесію і дозволяє активувати PDP Context (CreateChargingSessionResp).
3. Щоб дозволити IoT здійснити передачу даних, GGSN отримує доступ до білінгової системи із запитом на бронювання коштів (ReserveUnitReq) на одну одиницю трафіку відповідно до заключеного договору: це може бути кількість байт даних або одна транзакція.
4. Білінгова система перевіряє, чи є кошти для даного IoT відповідно до його тарифу на одну одиницю трафіку і відповідає повідомленням ReserveUnitResp («кошти заброньовані»). Приймаючи це повідомлення від білінгової системи, GGSN дозволяє IoT завантажувати трафік.
5. Коли IoT завантажив одну одиницю трафіку, GGSN отримує доступ до білінгової системи з повідомленням DebitUnitReq («Ви можете списати зарезервовані кошти»).
6. Білінгова система списує кошти і відповідає повідомленням DebitUnitResp («кошти успішно списані»).
7. Цикл ReserveUnitReq-DebitUnitResp повторюється до тих пір, поки IoT не завантажить весь запланований трафік і не закриє сесію.
8. Коли контекст PDP деактивований, GGSN надсилає повідомлення на білінгову систему про припинення платіжної сесії. Пам'ять, яка виділена для цього сеансу, звільняється. Білінгова система готова обробити наступний запит від GGSN на активацію PDP.

Схема тарифікації не складна: інформація про підключення та їх тривалості фіксується комутатором і після попередньої обробки передається в систему розрахунків. Система розрахунків при розрахунках враховує тарифи. Вона ідентифікує підключення і виконує необхідні розрахунки, тим самим формуючи рахунок абонента. Очевидно, що пам'ять системи повинна зберігати не тільки стандарти, тарифний план та інформацію про надану послугу а й дані про клієнтів, укладені договори з ними і сторонніми постачальниками послуг зв'язку, наприклад, у роумінгу, а особливості розрахунків з ділерами, у яких можуть бути і інші тарифи, наприклад, для підключення. Білінгова система використовує базу даних, в якій зберігається історія платежів, що дозволяє контролювати процес оплати рахунків і автоматизувати так звану активацію / деактивацію абонентів.

5.5. Висновки за розділом 5

1. Білінгова система є важливим елементом комерційної організації, яка надає послуги мобільного зв'язку.
2. Білінгова система надає можливість автоматизувати ведення обліку клієнтів, їх активності та істосовування тарифів, які передбачені у пакетах послуг, за умовою збереження якості наданих послуг.
3. Білінгової системи дозволить забезпечить автоматизований облік і розрахунок вартості наданих послуг за обслуговування мережі IoT, облік даних про клієнтів, що використовують пристрої IoT та отримують ці послуги, виставлення клієнтам рахунків щодо використання пристроїв IoT, податкових накладних, облік нарахувань та сплат за кожним клієнтом, виявлення і облік боржників та виставлення їм претензій, облік технічних засобів.
4. В роботі удосконалений типовий алгоритм білінгової системи, якій полягає в введенні поняття «одиниця обміну інформації», де одиницею може бути як блок інформації визначеного розміру (одна транзакція), так і

кількість таких блоків, що дозволяє використовувати білінгові системи для тарифікації обслуговування IoT як з великим, так і з малим трафіком.

Основні наукові та практичні результати розділу опубліковані в роботах [1,34,184,188,191,192,196,197,198,199,200].

РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ АЛГОРИТМІВ ТА МОДЕЛЕЙ

В даній дисертаційній роботі (розділи 1-5) було проведено концептуальне та математичне моделювання взаємодії мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей та визначені показники якості обслуговування як для мережі IoT, так і для мережі 5G. Деякі елементи цей взаємодії надані у вигляді системи масового обслуговування, де процес обробки даних здійснюється за запропонованими алгоритмами. Під час проведення цього моделювання, розробки чи вибору вищевказаних моделей та алгоритмів виникає задача оцінки їх ефективності. Ефективність моделювання визначається на практиці шляхом співставлення ефекту від використання його результатів і витрат на його проведення. Це визначає основні вимоги, що ставляться до моделей. Ефективність математичного моделювання може оцінюватися рядом часткових критеріїв, у тому числі: точністю результатів моделювання; адекватністю, економічністю, універсальністю моделі.

Серед методів моделювання широко використовується метод моделювання дискретних подій моделювання, який дозволяє уявити собі процес функціонування системи як послідовність подій. Кожна подія відбувається в певний момент часу і може змінити стан системи. На цей час для вирішення завдань дискретно-подієвого моделювання існує досить широкий спектр програм моделювання комунікаційних мереж від бібліотек функцій та стандартних компіляторів до спеціалізованих мов програмування.

Відомо, що ефект від моделювання зростає з підвищенням точності моделі. Як показник точності моделей було використано похибку ε як ступінь збігу результатів, отриманих на об'єкті IoT-5G (x^0) та за допомогою запропонованих моделей (x^m). Показники точності при моделюванні визначені векторними

$$\varepsilon_i = |x_i^0 - x_i^m|, \quad (6.1)$$

де i – номер показника ($i = \overline{1,3}$), що досліджується та визначається за

допомогою моделей,

x_1 - допустима затримка, x_2 - вірогідність втрати пакету, x_3 - джитер)
або скалярними, наприклад, у вигляді норми вектора похибок:

$$\|\varepsilon\| = \max_{1 \leq i \leq 3} \varepsilon_i . \quad (6.2)$$

Для оцінки результатів статистичного моделювання разом із показником точності був використаний показник достовірності отриманих оцінок α_i як ймовірність того, що похибка ε_i не перевищить задане значення ε_i^*

$$\alpha_i = p\left\{|x_i^0 - x_i^m| \leq \varepsilon_i^*\right\}, \text{ де } i = \overline{1,3}. \quad (6.3)$$

Адекватність моделей є якісним показником і характеризує їх здатність відображати властивості об'єкта з похибкою, що не перевищує заданого значення ε_i^* , тобто

$$\|\varepsilon\| \leq \varepsilon^* . \quad (6.4)$$

Адекватність моделі, як правило, має місце лише у деякій підобласті (області адекватності O_A) простору її зовнішніх параметрів $O_A \subseteq O$, тобто

$$O_A = \{O(\varepsilon_i) : \varepsilon_i \leq \varepsilon_i^*, i = \overline{1,3}\} . \quad (6.5)$$

де ε_i^* – допустима похибка визначення i -го параметру.

Стійкість моделей характеризувала ступінь можливого збурення вихідних змінних моделей при незначній зміні їх вхідних змінних.

З метою оцінки ефективності запропонованих моделей та алгоритмів в даному розділі дисертаційної роботи наведені результати проведеного комп'ютерного моделювання та відповідно проведено аналіз основних його результатів.

Аналітичні моделі та алгоритми їх реалізації перевірялися шляхом їх імітаційного моделювання за допомогою пакету програм GPSS World, який призначений для професійного імітаційного моделювання різномірних об'єктів. Він містить графічні оболонки для створення моделей та інтерпретації результатів моделювання, мультимедійні засоби і відео, об'єктно-орієнтоване програмування й ін. В основу системи покладена мова імітаційного моделювання GPSS.

6.1. Моделювання процесів в мережі IoT

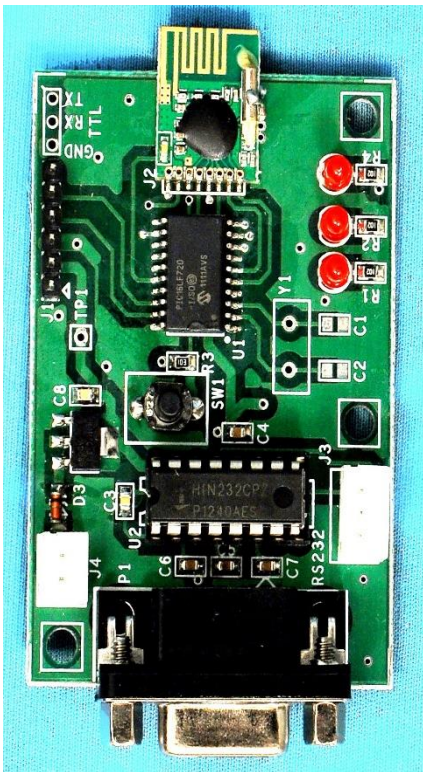


Рисунок 6.1. ZigBee
трансівер марки
WLZDP01

Реалізація концепції Інтернету речей пов'язана з побудовою мереж Інтернету речей, які дозволяють вирішувати завдання збору і доставки даних з вузлів мережі засобами обробки і споживачам. Широкий спектр можливих застосувань IoT-пристроїв також вимагає відповідних методів побудови та управління мережами IoT з урахуванням особливостей прикладних задач. Велика кількість вузлів в мережах IoT, а також особливості IoT-трафіку вимагають використання відповідних моделей для його опису, методів обслуговування і методів вибору структури мереж, які забезпечували б функціонування таких мереж в рамках різномірної структури перспективних мереж зв'язку. Основними технологіями побудови мереж IoT є технології бездротового зв'язку. Зі збільшенням кількості IoT і щільності даних мереж, ймовірно, будуть домінувати відносно технології зв'язку на короткі відстані, що використовують пристрої передачі з низьким енергоспоживанням. У цих умовах особливу роль відіграють методи вибору

структурних параметрів мереж і методів обслуговування трафіку, які б забезпечували необхідну якість функціонування IoT-мереж і запобігали впливу IoT-трафіку на якість обслуговування трафіку інших сервісів мережі 5G.

Обробка запитів в мережі IoT може бути здійснена за різними технологіями (див. розділ 1.3), але серед цих технологій від представників IoT-пристроїв є багато спільного. В якості прикладу в подальшому буде розглянута мережа ZigBee, яка спроможна працювати за топологією mesh (сітка), особливим випадком якої може бути з'єднання за топологією «точка-точка» (peer-to-peer, P2P), «ланцюг», «зірка», «дерево» або «кільце», а також за цією технологією можливо розглянути варіант багаторангової мережі, що не є обов'язковим за іншими технологіями.

Zigbee та IEEE 802.15.4 описують бездротові персональні мережі (WPAN). Специфікація Zigbee орієнтована на додатки, які вимагають гарантованої безпечної передачі даних на відносно низьких швидкостях і можливості тривалої роботи мережевих пристроїв від автономних джерел живлення (акумуляторів).

Головною особливістю технології Zigbee є те, що вона підтримує не тільки прості топології мережі, але і самоорганізується і самовідновлювальну сітчасту mesh-топологію з ретрансляцією повідомлень і маршрутизацією з низьким енергоспоживанням. Крім того, специфікація Zigbee включає в себе можливість вибору алгоритму маршрутизації в залежності від вимог додатків і умов мережі, механізм стандартизації додатків, такий як профілі додатків, бібліотеку стандартних кластерів, кінцевих точок, прив'язок, гнучкий механізм безпеки, забезпечує простоту розгортання, обслуговування і модернізації.

Фізичний рівень РНУ надає два типи послуг: інформаційній сервіс РНУ та сервіс правління, якій забезпечує взаємодію з сервісом, якій відомій як PLME-SAP (Physical Layer Management Entity, PLME) точки доступу SAP. Інформаційній сервіс РНУ дозволяє передавати і приймати за радіоканалом

блоки даних протоколу (Protocol Data Unit, PDU). На фізичному рівні активуються і деактивуються радіопередавачі, детектування енергії в поточному каналі (ED), індикатор якості зв'язку для отриманих пакетів (LQI), вибір частоти випромінювання для каналів, оцінка того, що канал не зайнятий (Clear Channel Assessment, CCA), а також здійснюється прийом та передача пакетів через фізичне середовище. Радіообладнання працює на одному з неліцензованих діапазонів частот:

- 868-868,6 МГц (наприклад, для Європи);
- 902-928 МГц (для Північної Америки);
- 2400-2483,5 МГц (для решти світу).

Існує три різних типи пристроїв: координатор, маршрутизатор, кінцевий пристрій.

Координатор (Zigbee Coordinator, ZC) є найбільш відповідальним пристроєм, формує шляхи мережевого дерева і може спілкуватися з іншими мережами. Кожна мережа має одного координатора Zigbee. Він запускає мережу з самого початку. Він зберігає інформацію про мережу, діє як довірений орган і зберігає ключі безпеки. Координатор як система масового обслуговування наданий на рис.6.2.

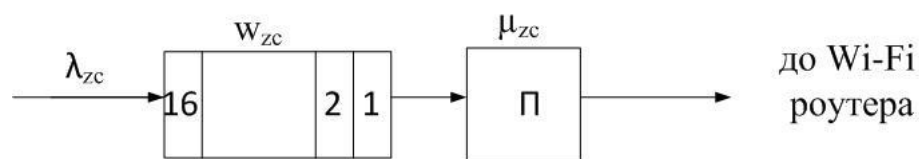


Рисунок 6.2. Координатор як система масового обслуговування

Маршрутизатор (Zigbee Router, ZR) може виступати в якості проміжного маршрутизатора, передаючи дані від кінцевих IoT-пристроїв до координатору або до іншого маршрутизатора. Він також може запускати функцію програми. Маршрутизатор як система масового обслуговування наданий на рис.6.3.

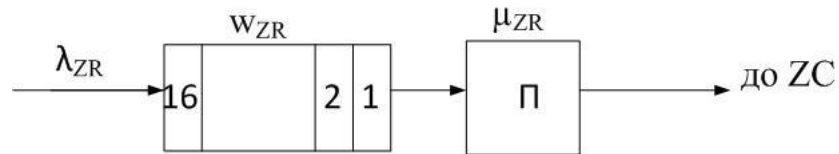


Рисунок 6.3. Маршрутизатор як система масового обслуговування

Кінцевий пристрій (Zigbee End Device, ZED). Його функціональне навантаження дозволяє йому обмінюватися інформацією з материнським вузлом (або координатором, або маршрутизатором), він може передавати дані на інші пристрої. Якщо він не передає дані, то залишатися в сплячому стані лівову частку часу, що дозволяє економити енергію акумулятора. Загальна схема потоків даних надана на рис.6.4.

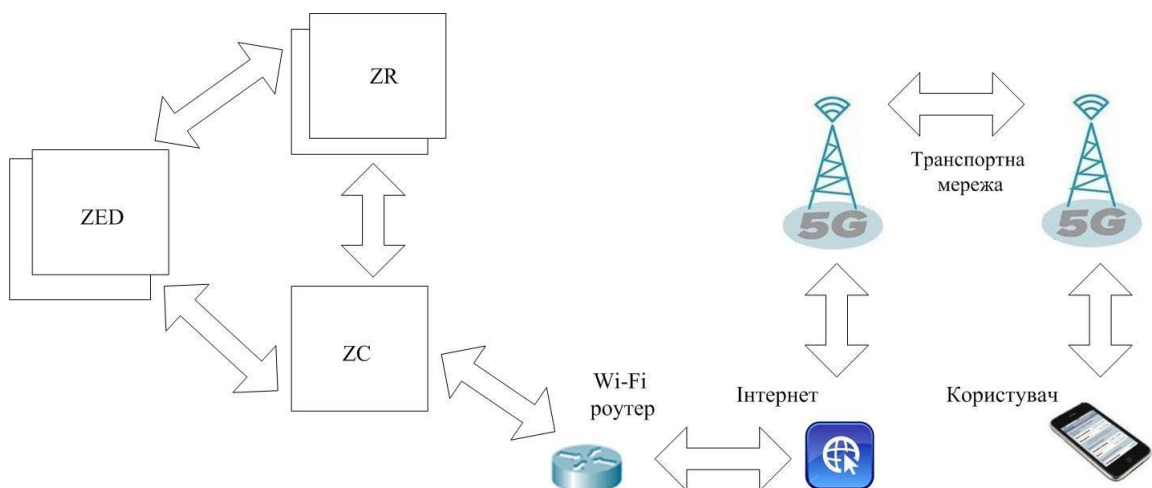


Рисунок 6.4. Потіки даних між пристроями ZigBee

На даний момент протокол Zigbee підтримує мережі з включеними або відключеними оповіщеннями (маяками) про присутність в мережі. Мережі з відключеними маяками (де порядок маяків дорівнює 15) використовують множинний доступ з контролем несної для запобігання зіткнень (CSMA/CA). Основним режимом доступу до каналу є «управління несною частотою, множинний доступ/уникнення зіткнень кадрів» (CSMA/CA - імовірнісний мережевий протокол канального рівня MAC). Тобто, перед тим, як IoT-пристрої почнуть передавати інформацією до маршрутизатору, вони

ненадовго перевіряють, щоб жоден з них вже не почав передавати інформацією.

У мережах з маяками всі типи IoT-пристроїв Zigbee можуть передавати періодичні маяки для підтвердження їх присутності на інших вузлах мережі. Вузли можуть перебувати в сплячому стані між маяками, що скорочує їх робочий цикл і збільшує термін служби батарей. Інтервали маяка можуть змінюватися від 15,36 мс до $15,36 \text{ мс} \cdot 214 = 251,65824 \text{ с}$ для швидкості в 250 кбіт/с, від 24 мс до $24 \text{ мс} \cdot 214 = 393,216 \text{ с}$ для швидкості в 40 кбіт/с та від 48 мс до $48 \text{ мс} \cdot 214 = 786,432 \text{ с}$ для 20 кбіт/с. Таким чином, у мережах з маяками існує низький робочий цикл операцій (сигналів) разом з великими інтервалами маяків.

Всього існує 27 каналів ZigBee, які пронумеровані від 0 до 26, в трьох діапазонах частот: шістнадцять каналів доступні в діапазоні 2405 МГц, 10 - в діапазоні 915 МГц і 1 - в діапазоні 868 МГц.

Основну частоту (FC) для кожного каналу можна розрахувати як

$$\begin{aligned} FC &= 868.3 \text{ МГц для } ch = 0 \\ FC &= (906 + 2 \cdot (ch - 1)) \text{ МГц для } ch = \overline{1,10}, \\ FC &= (2405 + 5 \cdot (ch - 1)) \text{ МГц для } ch = \overline{11,26} \end{aligned} \quad (6.6)$$

де $ch = \overline{0,26}$ - номер каналу.

У табл.6.1 визначена параметри каналу передачі даних за радіоканалом в залежності від радіодіапазону.

Таблиця 6.1

Параметри каналу передачі даних Zigbee-пристроями

Частота, МГц	Швидкість передачі даних, кбіт/с	Період запитів за маяками
2400	250	15 мс ÷ 251 с
915	40	24 мс ÷ 333 с
868	20	48 мс ÷ 786 с

Максимальна відстань досяжності (Personal Operating Space, POS) становить від 10 до 75 метрів і понад 1500 метрів для Zigbee pro, хоча вона сильно залежить від індивідуального обладнання. Максимальна вихідна потужність передавача в основному становить 0 дБм (1 мВт).

Щоб здійснити моделювання мережі IoT, потрібно визначитися з її трафіком, тобто визначити параметри вхідного потоку запитів від кінцевих пристроїв IoT до маршрутизатору, який зформує свій вихідний потік. Потім вихідні потоки від маршрутизаторів поступають в якості вхідних до координатора, вихідний потік з якого поступає, наприклад, через Wi-Fi роутер до мережі 5G. Мультимедійний трафік реального часу має властивості самоподібності та характеризується значними «сплесками» інтенсивності пакетів. При цьому, мультимедійний трафік IoT-пристроїв, як правило, відрізняється алгоритмами функціонування пристроїв та їх призначенням. Це може бути пристрій IoT-HD-camera високої чіткості або пристрій IoT-telemetry, пристрій IoT-appliances або IoT-lightbulb, або IoT-health monitor. Кожен з цих пристроїв буде генерувати мультимедійний трафік. Однак цей трафік буде відрізнятися нерівномірністю інтенсивності надходження пакетів та наявністю значних «сплесків» на одних інтервалах часу та практичної їхньої відсутності на інших. При обслуговуванні мультимедійного трафіку IoT-пристроїв у мережі досить складно забезпечити необхідні характеристики QoS/QoE, такі як пропускна спроможність та час затримки [148]. Тому в подальшому при моделюванні будемо керуватися припущеннями при прогнозуванні характеристик IoT-трафіку, що дозволить отримати результати щодо поведінки трафіку та передбачити необхідну продуктивність IoT-пристроїв для запобігання перевантажень та підтримки необхідних характеристик QoS/QoE.

6.2. Моделі трафіку інтернету речей

Галузями застосування IoT-пристроїв можуть бути:

- домашні розваги щодо фільмів та музиці (тип 1);
- домашнє оповіщення від датчиків води та електроенергії, диму та вогню, управління раціональним освітленням та температурою (тип 2);
- мобільні послуги – мобільні платежі, безпека та контроль доступу, охорона здоров'я та теледопомога (тип 3);
- комерційне будівництво – потужна енергетика, опалення, вентиляція та кондиціонування повітря, електроосвітлення (тип 4);
- промислове обладнання – контроль процесів, промислових технологій, енергії та майна (тип 5).

Неоднорідний трафік (такий як голос, дані, зображення тощо) вимагає використання найбільш відповідного математичного апарату для створення адекватної моделі. Одні моделі трафіку правильніше описувати методами математичної статистики, які засновані на розподілах ймовірностей, інші - на методах фрактального аналізу. У моделях потоку запитів кожен IP-пакет розглядається як запит (в подальшому в моделях - транзакція), який повинен бути обслужений, тобто переданий, прийнятий або оброблений. Трафік, що генерується IP-пакетами, характеризується такими параметрами, як:

- інтенсивність пакетів (пакетів / с);
- середня довжина пакета (біти, байти);
- часовий інтервал між пакетами (с) або інтенсивність трафіку (біт/с);
- частка втрачених пакетів (%);
- частка пакетів з помилками (%) та ін.

Моделі трафіку також можна умовно розділити на моделі, що використовуються для опису трафіку в мережах з комутацією ланцюгів і з комутацією пакетів. У мережах з комутацією ланцюгів широко використовуються розподіли «світлового хвоста» (наприклад, розподіл

Пуассона). Цей розподіл добре описує кількість дзвінків (запитів), що надходять на вузол комутації в одиницю часу в залежності від середньої інтенсивності в ході замовлень. Проміжки часу між надходженням таких заявок мають експоненціальний розподіл. Найпростіший потік має такі властивості: стаціонарність, буденність, відсутність післядії, а сумарний потік порядків двох і більше потоків Пуассона також є пуассонівським, що значно спрощує процес моделювання. У мережах з комутацією пакетів розподіл Пуассона широко використовується в моделях трафіку, що генеруються пристроями IoT (див. розділ 3.7).

Під розподілом Пуассона розуміється розподіл дискретного типу випадкової величини, що представляє собою кількість подій, що відбулися за фіксований час, за умови, що ці події відбуваються з деякою фіксованою середньою інтенсивністю λ і незалежно один від одного. Моделі, засновані на розподілі Пуассона, не завжди підходять для коректного моделювання трафіку в мережах з комутацією пакетів. У розподілі Пуассона більшість подій зосереджені поблизу математичного очікування, і лише невелика їх частина зосереджена далеко від середнього. Розподіл Пуассона (6.2) відноситься до розподілів з так званими «легкими хвостами», які мають відносно швидке зниження значення ймовірності, виражене експоненційно затухаючою функцією:

$$p(k) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda}, \quad (6.7)$$

де, наприклад, $p(k)$ – ймовірність k відмов в обслуговуванні запитів від IoT, λ - інтенсивність запитів від IoT-пристроїв на обслуговування.

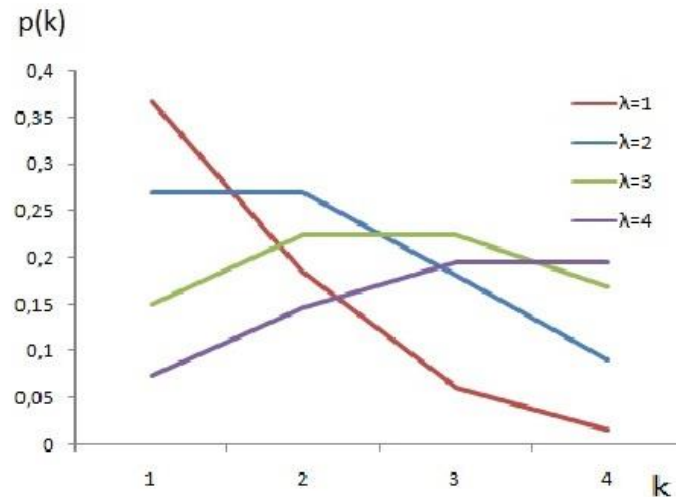


Рисунок 6.5. Графік ймовірності k відмов в обслуговуванні запитів від IoT в залежності від інтенсивності запитів λ

Графік цієї функції наданий на рис.6.5, її імітаційна модель надана у Додатку Г, результати моделювання надані у Додатку Д. Ця модель в подальшому використана при моделюванні обслуговування запитів IoT в мережі 5G (див. розділ 6.3).

Більшість моделей трафіку IoT-пристроїв набагато точніше апроксимуються розподілами, хвости яких зменшуються набагато повільніше, ніж експоненціальна функція Пуассона. Наприклад, в літакових сенсорних IoT-мережах датчики сенсорного поля передають дані, коли маршрутизатор знаходиться в зоні електромагнітної досяжності, і припиняє передачу даних, коли маршрутизатор залишає зону цей досяжності. Такого роду трафік:

- по-перше, буде мати великий розкид в часових проміжках між моментами надходження заявок;
- по-друге, дані будуть досить часто присутні в вибірці навіть при значному відхиленні від середнього значення.

Тому буде відбуватися повільне зменшення хвоста розподільної функції. Такі розподіли відносяться до розподілів «з важкими хвостами», які мають повільно згасаючу функцію, виражену степеневим законом, наприклад, розподіл за Парето (6.3) :

$$p(k > x_m) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } k < x_m \\ \frac{\alpha \cdot x_m^\alpha}{x^{\alpha+1}}, & \text{якщо } k \geq x_m \end{cases} \quad (6.8)$$

де, наприклад, $p(k > x_m)$ – ймовірність того, що в обслуговуванні запитів від IoT кількість відмов (k) буде більше, ніж параметр масштабування x_m ; α – параметр форми.

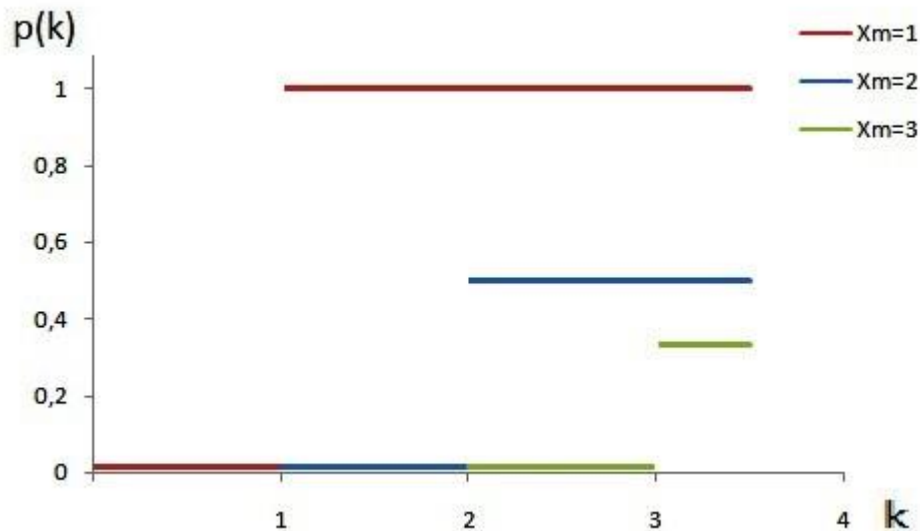


Рисунок 6.6. Графік ймовірності того, що кількість відмов k в обслуговуванні запитів від IoT буде більше, ніж параметр масштабування x_m ($\alpha = 1$)

За цими розподілами в цієї роботі буде визначений один з показників якості обслуговування IoT-запитів в мережі 5G як ймовірність втрати пакетів.

6.3. Моделі трафіку на основі потоку запитів

Трафік IoT можна розглядати як потік запитів, а запити означають пакети, оскільки мережа зв'язку IoT-IoT в основному комутується пакетами. Обмін даними здійснюється між мережевими кінцевими пристроями, які не завжди можуть самостійно ініціювати події, що відбуваються в мережі, тому варіанти подій діляться на три групи, в залежності від способу обміну інформацією:

- події, пов'язані з роботою мережі - ініціалізація IoT-пристрою, реакція

на відключення або включення його живлення, перезапуск IoT-пристрою, іншими словами, технічні причини;

- події, пов'язані з реакцією на зміну зовнішніх факторів - ті події, на які, в першу чергу, орієнтовані мережеві пристрої IoT - реакція датчиків, пристроїв на зміни навколишнього середовища, зміни параметрів самого IoT-пристрою;

- події, пов'язані із закінченням конкретного часового інтервалу - тайм-аутів - тимчасових інтервалів, тривалість яких встановлюється відповідно до будь-якого закону, вони можуть встановлюватися як фіксовано, так і динамічно.

Виходячи з цих груп подій, можна виділити три типи IoT-трафіку:

- опосередкований трафік – трафік такого типу виробляється в мережі, яка складається з активних пристроїв. Це реакція на зовнішню (можливо, випадкову) подію. Такою подією, наприклад, може бути спрацьовування датчика, входження величини, яку контролює датчик, в певний цільовий діапазон. Властивості цього трафіку залежать від процесів, які контролюються системою зовнішніх процесів і подій.

- детермінований трафік виробляється пристроєм або мережею, в якій мають місце тільки «пасивні» пристрої. Він проводиться як відповідь на запит. Останнє іноді можна розглядати як випадкове або заздалегідь обумовлена (детермінована) подія. Прикладом може служити трафік системи моніторингу та збору даних. У таких системах зазвичай використовується структура Master-Slave. Маршрутизатор (Master) в цій структурі генерує і відправляє запит, а підлеглі IoT-пристрої (Slave) відправляє необхідні дані на основний пристрій (маршрутизатор).

- сервісний трафік, як і непрямий, виробляється активними елементами мережі IoT (координаторами, маршрутизаторами). Цей трафік виникає в результаті реакції на випадкову зовнішню подію, що порушує нормальне функціонування системи. Це трафік, який виробляється, наприклад, в результаті помилки або збою в роботі пристрою або програмного

забезпечення. Даний вид трафіку може спостерігатися в результаті апаратних або програмних збоїв. Його мета - відновити нормальне функціонування системи. Наприклад, повторна ініціалізація параметрів пристрою, переналаштування мережі, конфігурація параметрів і т.і. Зазвичай поява службового трафіку в системі супроводжується також генерацією сигнального (керуючого) трафіку.

Виходячи з цих типів IoT-трафіку, серед моделей IoT-трафіку на основі потоку запитів в подальшому будуть розглянути гауссова модель трафіку, модель ON/OFF трафіку та моделі IoT-трафіку з розподілами за обмежений інтервал часу.

6.3.1. Гауссова модель трафіку

Однією з областей застосування бездротової сенсорної мережі може бути літакова сенсорна мережа. Така мережа складається з двох взаємодіючих сегментів: літакового і наземного. Літаковий сегмент відповідає за прийом, зберігання і передачу інформації між вузлами наземного сегменту, а також дозволяє їм підключатися до сенсорної мережі. Моделювання трафіку для таких мереж необхідно для вирішення ряду завдань:

- підвищення енергоефективності вузлів мережі;
- дослідження можливих перевантажень мережі і перешкод між вузлами;
- вибір коректності протоколів маршрутизації та адресації в мережі;
- розробка оптимальної архітектури з'єднання вузлів мережі.

Джерелами трафіку є вузли наземного сегменту мережі, які збирають інформацію і при необхідності управляють її віддаленим об'єктом, працюють в автономному режимі, мають невеликі розміри і можуть тривалий час перебувати в сплячому режимі. Вони можуть збирати дані про вологість, температуру, шум, тиск, освітленість і т.і. Сенсорні вузли утворюють поля

датчиків (сенсорні поля), які надають можливість відстежувати різні фізичні процеси всіма датчиками одночасно та можуть передавати дані за цими процесами в бездротову мережу в режимі безперервної передачі. При цьому, серед цих даних можуть бути ті, що видко змінюється, наприклад, відео зображення, і ті, що змінюється дуже повільно, наприклад, температури оточуючого середовища.

Для моделі трафіку відеозображення можна розглянути два сценарію:

- вузол наземної сенсорної мережі безперервне передає дані зображення з максимальною для SigBee швидкістю 250 Кбіт/с;
- вузол наземної сенсорної мережі використовує вихідне кодування (стиснення даних без втрат) для стиснення сигналу відео з метою зниження енергоспоживання вузла при безперервної передачі.

В результаті модель такого трафіку буде мати гаусовий розподіл потоку запитів з нульовим середнім і дисперсією, які змінюються з плином часу. Зміна дисперсії призводить до нестационарного потоку трафіку.

Для моделей передачі даних щодо температури оточуючого середовища також слід розглянути ті ж два сценарію:

- з безперервною передачею некодованих даних з максимальною швидкістю передачі;
- зі стисненням даних без втрат.

Для такій моделі трафік IoT-запитів також розподіляється за законом Гауса з нульовим середнім, але на відміну від попередніх моделей в моделях температурних даних крива розподілу Гауса має постійну дисперсію.

Для побудови моделі розглянемо наземний сегмент літакової сенсорної мережі (див. рис.2.7), якій складається з однотипних IoT-пристроїв типу ZigBee, тобто однакові формати і довжини переданих повідомлень, вимоги до якості їх доставки та інтенсивності передачі для кожного. Тип ZigBee був обраний не випадково, тому, що для наземного сегменту літакової сенсорної мережі система збору і контролю даних повинна функціонувати в реальному часі, де, як правило, не потрібна занадто висока швидкість обміну даними.

Вхідний потік повідомлень від кожного IoT-пристрою - пуассонівський з інтенсивністю λ (див. розділ 2.5). На каналному рівні визначаються формат і довжина переданих повідомлень і способи їх передачі (див. табл.2.1).

Повідомлення передаються в кадрах довжиною від 41 до 168 байт, кожен кадр містить метадані (5 байт) і безпосередньо корисну інформацію від 1 до 128 байт. Кожен кадр складається з наступних компонентів:

- заголовок синхронізації (SHR), який дозволяє приймаючому пристрою синхронізуватися з потоком бітів (32 біта);
- заголовок РНУ (PHR), який містить дані про довжину кадру (8 біт);
- поле даних змінної довжини від 1 до 128 байт (PSDU).

Основною характеристикою якості обслуговування мережі IoT є ймовірність очікування $P_{w>0}$ ($W > 0$ означає, що є тайм-аут), яку можна визначити з функції розподілу станів системи P_k . В умовах потоку Пуассона $P_{w>0}$ дорівнює ймовірності зайнятості комутатора з урахуванням всіх можливих станів черги (комутатор зайнятий і 0 запитів в черзі, комутатор зайнятий і 1 запит в черзі, 2 запитів в черзі і т.д.):

$$P_{w>0} = \sum_{k=1}^{\infty} P_k = \frac{\Lambda}{1 - \Lambda} \cdot P_0, \quad (6.9)$$

де k - стан системи ($0 < k < 1$ - комутатор, $1 < k < \infty$ - черга);

$\Lambda = \frac{\lambda}{\mu}$ - коефіцієнт завантаження комутатора;

P_0 - імовірність того, що в системі немає необроблених запитів від IoT;

P_k - імовірність k -го місця запиту у черзі комутатора.

Відповідно до Додатку Д для комутатора, який реалізований на IoT-пристроях типу ZigBee, коефіцієнт завантаження комутатора ZR визначений у розмірі 0,985 (виділено жовтим кольором) при пуассонівському вхідному потоці, агрегованому від всіх IoT-пристроїв ZED, з інтенсивністю 8 пак/с.

Середню довжину черзі до комутатору Q (середня кількість запитів у черзі) можна знайти з розподілу ймовірностей станів системи P_k при $k=2, 3, \dots, \infty$ (у черзі запитів 1, 2 тощо) за правилом розрахунку математичного сподівання:

$$Q = \sum_{k=2}^{\infty} (k-1) \cdot P_k = \Lambda \cdot P_0 \sum_{k=2}^{\infty} (k-1) \cdot \Lambda^{k-1} = \Lambda \cdot P_0 \cdot \frac{\Lambda}{(1-\Lambda)^2} = \frac{\Lambda}{1-\Lambda} \cdot P_{W>0}, \quad (6.10)$$

де k - номер запиту у черзі;

$\Lambda = \frac{\lambda}{\mu}$ - коефіцієнт завантаження маршрутизатора;

$P_{W>0}$ - імовірність очікування у черзі.

Середній час очікування для будь-якого запиту W знаходиться за формулою Литла, де за W одиниць часу очікування в черзі надійде в середньому $Q = \Lambda W$ запитів:

$$W = \frac{Q}{\Lambda} = \frac{1}{1-\Lambda} \cdot P_{W>0}, \quad (6.11)$$

де Q - середня довжина черзі;

$\Lambda = \frac{\lambda}{\mu}$ - коефіцієнт завантаження маршрутизатора;

$P_{W>0}$ - імовірність очікування у черзі.

Відповідно до Додатку Д для комутатора, який реалізований на IoT-пристроях типу ZigBee, середня довжина черзі до комутатора ZR визначена у розмірі 65 пакетів (виділено синім кольором) та середньоквадратичним відхиленням 43 пакету. Середньоквадратичне відхилення параметра довжини черзі у розмірі майже 66% від середнього його значення не призвело до збурення вихідних змінних моделі, тому таку модель можливо рахувати стійкою. Середній час очікування пакету в черзі визначений у розмірі 65,515 мс (виділено зеленим кольором) за результатами моделювання, та 65,759 мс

за формулою (6.24). Адекватність моделі можна оцінити похибкою визначення параметру часу очікування в черзі:

$$\varepsilon = \left| \frac{65,759 - 65,515}{65,759} \right| = 0,0037 \approx 0,4\%, \quad (6.12)$$

що є досить допустимою похибкою визначення параметра часу та складає 3,7 мкс.

На рівні каналів для поділу загального ефірного середовища між IoT-пристроями використовується метод синхронного часу множинного доступу, який передбачає, що весь час використання радіоканалу ділиться на цикли T_C , а цикли діляться на часові вікна, кожен з тривалістю t_s , кількість яких визначається відповідно до кількості IoT-пристроїв. У кожному циклі, в своєму часовому вікні, тільки один конкретний IoT-пристрій має право передавати один кадр, але, якщо у нього немає повідомлення для передачі, радіоканал фактично простоює, оскільки передається стандартне кероване сповіщення, що дані для передачі відсутні. Тривалість часового вікна включає час на передачу пакету, тривалість сигналу запиту (маяка) t_p , а також включає час, необхідний для передачі квитанції t_M в зворотному напрямку (до вузла маршрутизатора від вузла кінцевого пристрою) і час, необхідний для декодування даних і квитанції. Підсумкова формула розрахунку тривалості часового вікна t_s , тобто часу обслуговування сенсорного пристрою у режимі запиту, виглядає наступним чином:

$$t_s = t_p + \frac{\bar{b}}{C} + t_M, \quad (6.13)$$

де t_p - тривалість маяка, с;

t_M - час, необхідний для передачі квитанції, с;

\bar{b} - середнє значення довжини пакету, біт;

C - швидкість передачі даних, біт/с (див. табл.6.1).

Час кодування та декодування даних та квитанції складає близько 10^{-8} с, тому в подальших розрахунках не застосовується. Також не буде

враховується затримка на розповсюдження сигналу в бездротовій мережі на малих відстанях між кінцевим пристроєм та маршрутизатором.

Повний цикл взаємодії кінцевих IoT-пристроїв та маршрутизатора складає:

$$T_s = N \cdot t_s, \quad (6.14)$$

Якщо кожний з N кінцевих IoT-пристроїв передає у середньому λ пакетів в секунду, та загальна інтенсивність потоку запитів складає $N\lambda$ пакетів в секунду, а середній інтервал цих запитів складає $1/(N\lambda)$ секунд. Тому, щоб уникнути необмеженого зростання черги до комутатора, розмір часового вікна повинен відповідати умові

$$\bar{t}_s = t_p + \frac{\bar{b}}{C} + t_M \leq \frac{1}{N\lambda} \quad (6.14)$$

або

$$\bar{\lambda} \leq \frac{C}{N \cdot (C \cdot (t_p + t_M) + \bar{b})}. \quad (6.16)$$

Відповідно до цієї умови будь-яке з кінцевих IoT-пристроїв опитується комутатором кожні $1/\lambda$ секунд. В той же час в ньому формується черговий пакет даних.

У табл.6.3 розрахована максимальна кількість кінцевих IoT-пристроїв типу ZigBee за різними типами сенсорних мереж (див. табл.6.2).

Таблиця 6.3

Кількість IoT-пристроїв

Частота, МГц	Швидкість передачі даних, кбіт/с	Довжина пакету, байт	Розмір часового вікна, с	Інтенсивність потоку запитів, пак/с	N_{\max} , од.
2400	250	280	0,01	8	11
		90	0,005		26
		160	0,01		18
		120	0,01		21

		80	0,00		27
915	40	280	0,06	8	2
		90	0,02		6
		160	0,03		4
		120	0,03		5
		80	0,02		7
868	20	280	0,11	8	1
		90	0,04		3
		160	0,07		2
		120	0,05		3
		80	0,03		4

З табл.6.3 видно, що кількість кінцевих IoT-пристроїв типу ZigBee для діапазону 2400 МГц в залежності від типу вхідного трафіку складає десятки одиниць максимально, що для більшості сфер застосувань є достатнім. Для літакової сенсорній мережі потрібно застосовувати пакети довжиною сотні біт і інтенсивність потоків розміром менш одиниці пакетів в секунду, щоб забезпечити сенсорне поле розміром тисячі одиниць.

В загальному виді залежність розміру часового вікна від інтенсивності потоку (для $f=2400$ МГц, $b=90$ байт) надана на рис.6.7.

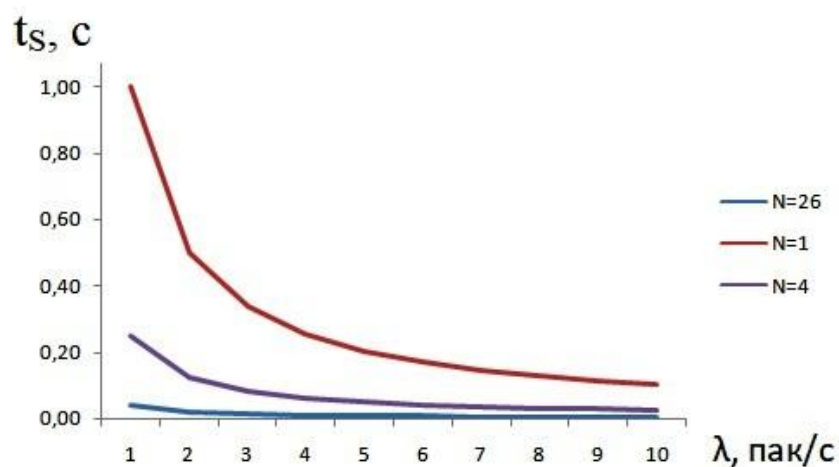


Рисунок 6.7. Залежність розміру часового вікна від інтенсивності потоку та кількості IoT-пристроїв

В режимі множинного доступу доступ до маршрутизатора розподіляється між конкуруючими запитами від кінцевих IoT-пристроїв відповідно до керованого імовірнісного арбітражу. Якщо є дані для передачі, IoT-пристрій починає передавати пакет до маршрутизатора.

Передача припиняється і відміняється IoT-пристроєм при виявленні перетину з пакетами інших IoT-пристроїв. При відсутності перетину пакет передається за призначенням. Щоб уникнути повторення конфліктів, IoT-пристрої знову передають дані через довільні проміжки часу, де інтервали між повторами пакетів розраховуються як функція історії конфліктів. Множинний доступ може бути реалізований в тактовому або нетактовому режимі передачі. У нетактованому режимі IoT-пристрої передають дані в будь-який час. У тактовому режимі передача допускається тільки через задані проміжки часу. Тактований цикл дорівнює максимальному проміжку часу між моментом початку передачі від IoT-пристрою і моментом виявлення конфлікту. Ймовірність того, що рівно один IoT-пристрій спробує передати пакет протягом тактового циклу і отримати доступ до маршрутизатора визначається за формулою:

$$P = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1}, \quad (6.17)$$

де P - ймовірність того, що рівно один IoT-пристрій спробує передати пакет протягом тактового циклу і отримати доступ до маршрутизатора;

N - кількість IoT-пристроїв, які готові до передачі, або за графіком (рис.6.8).

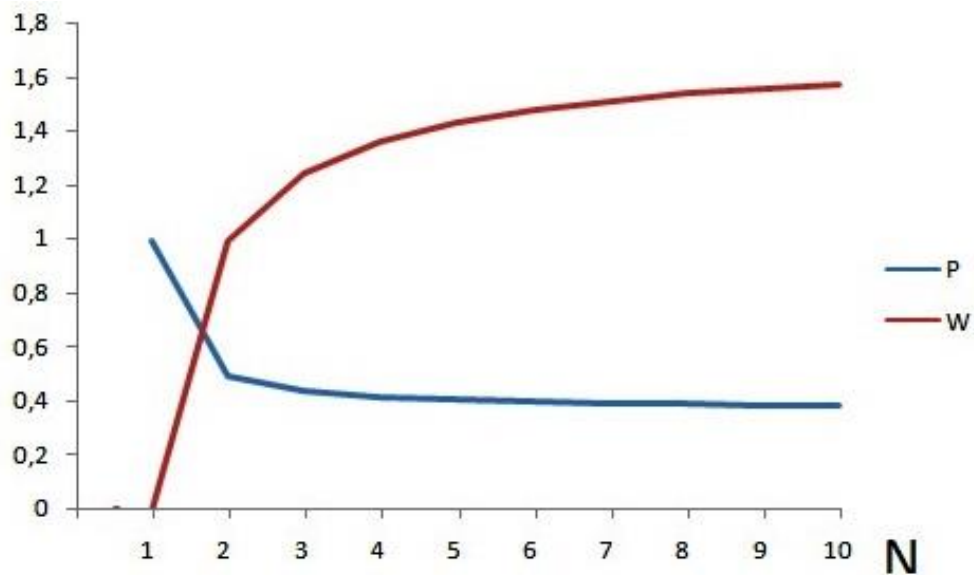


Рисунок 6.8. Ймовірність того, що рівно один IoT-пристрій спробує передати пакет протягом тактового циклу і отримати доступ до маршрутизатора

Ефективність режиму множинного доступу, або доля часу, протягом якого пакети передаються без повторень, визначається наступним чином:

$$\rho = \frac{b/C}{b/C + W \cdot T_c}, \quad (6.18)$$

$$W = \frac{1-P}{P}, \quad (6.19)$$

де W – середня кількість тактових циклів, що пройшли в інтервалі змагань, поки IoT-пристрій не отримає доступ для передачі даних (рис.6.8);

T_c - тривалість циклу.

На рис.6.9 показані результати моделювання мережі IoT-пристроїв при передачі даних на комутатор в режимі запиту та в режимі множинного доступу.

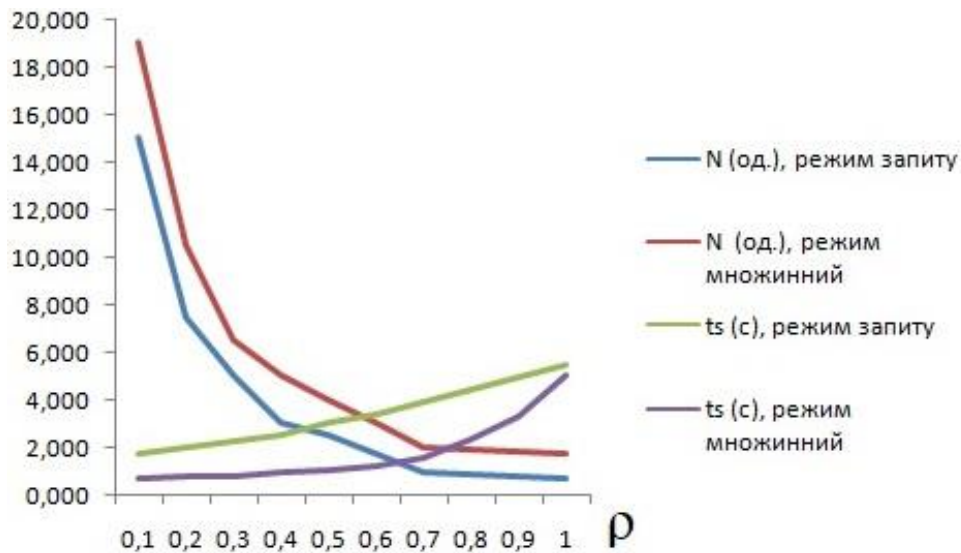


Рисунок 6.9. Порівняння режимів доступу IoT-пристроїв до комутатора

Для оцінки адекватності моделі було застосовано значення середньої похибки моделі моделювання параметра N як параметра з максимальним діапазоном значень (рис.6.10). Середня похибка моделювання визначалася відповідно до виразу:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{N_{i \text{ мод}} - N_{i \text{ ан}}}{N_{i \text{ мод}}} \right| = \frac{1}{10} \cdot 35,381 \approx 3,5, \quad (6.20)$$

де n – кількість значень параметра N ;

$N_{i \text{ мод}}$ - отримане в результаті моделювання i -е значення параметра N ;

$N_{i \text{ ан}}$ - отримане в результаті аналітичного розрахунку i -е значення параметра N .

Отримана оцінка моделі не дозволяє в повному обсязі прийняти її адекватність при будь-яких значеннях її параметрів, але в діапазоні значень $\rho = \overline{0,2;0,9}$ модель забезпечує похибку моделювання менш, ніж 1%, що є припустимим значенням. В діапазоні значень $\rho \leq 0,2 \cup \rho \geq 0,9$ також не можливо рахувати стійкою.

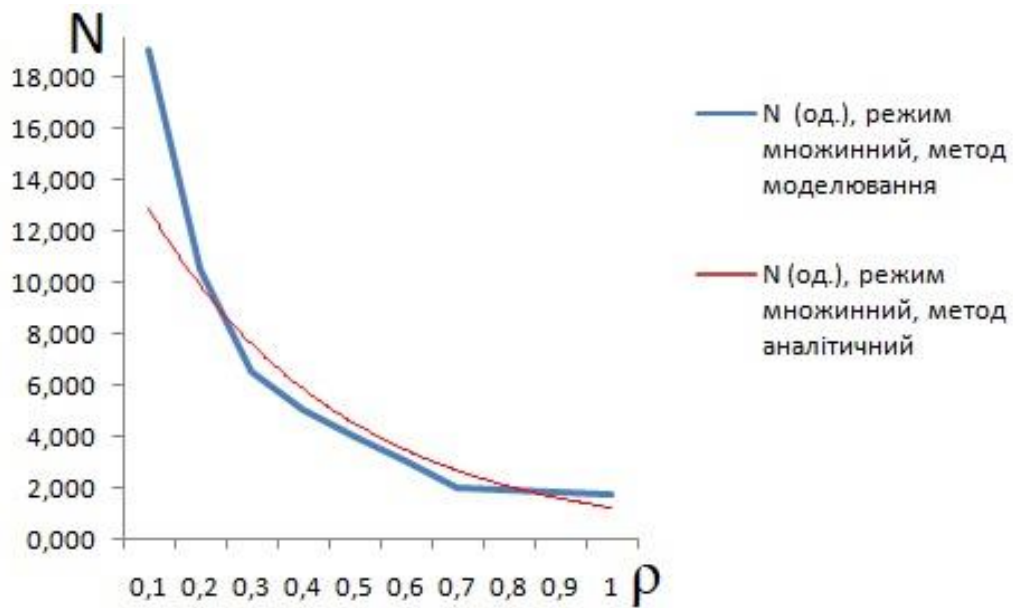


Рисунок 6.10. Оцінка адекватності моделі

За результатами моделювання визначено, що при збільшенні кількості IoT-пристроїв, які взаємодіють з маршрутизатором, середній час обслуговування запиту збільшується. При такому порядку, якщо існують вимоги щодо часу обслуговування, то модель дозволяє визначити максимальну кількість IoT-пристроїв, які підключені до маршрутизатора. На рис.6.9 показаний графік максимальної кількості IoT-пристроїв (N) типу ZigBee в залежності від коефіцієнту навантаження комутатора (ρ). Порівняльні результати демонструють перевагу множинного доступу в організації взаємодії між IoT-пристроями та комутатором при будь-якому його навантаженні. Таким чином, при плануванні організації кластерної структури мережі IoT-пристроїв модель дозволяє здійснювати вибір оптимального розміру кластеру в залежності від потребуємого розміру часового вікна. На рис.6.9 наведені результати залежності максимальної кількості IoT-пристроїв та розміру часового вікна за двома режимами доступу IoT-пристроїв до комутатора, де показано, що ці показники суттєво залежать від реальної інтенсивності трафіку. За результатами моделювання визначено, що організація множинного доступу має переваги, але при цьому

збільшується вірогідність виникнення колізій, що потребує від IoT-пристроїв весь час знаходитися в активному режимі та витратити ємність батареї живлення та скоротити свій час працездатності. З практики, наявність високого навантаження має мале відношення до реальності, т.к. IoT-пристроєм треба чередувати «сплячий» режим та режим «бадьорості», щоб забезпечити зберігання ємності акумуляторної батареї та максимальну тривалість функціонування. З іншої сторони, при низькому навантаженні маршрутизатора показники режимів доступу вже відрізняються незначно. В цьому випадку режим запитів є більш привабливим, т.к. майже всі дії здійснюються маршрутизатором, а IoT-пристрої можуть не виходити з «сплячого» режиму при відсутності даних для передачі і при цьому зберігати ємність батареї.

6.3.2. Модель ON/OFF (вмикання/вимикання) трафіку

Ще однією областю застосування літакових сенсорних мереж є використання вузлів сенсорних полів для спостереження за цілями. Трафік, що генерується вузлами сенсорного поля, сильно залежить від мережевого сценарію. Все різноманіття сценаріїв генерування IoT-запитів можна розділити на три типу:

- періодична відправка даних, наприклад, модель відправки даних постійного бітрейту (CBR);
- відправка даних за запитом;
- надсилання даних на основі подій.

Спостереження за цілями - це генерація даних на основі подій. Вузли наземної сенсорної мережі відправляють дані тільки в тому випадку, якщо відбулася подія - поява об'єкта спостереження (цілі) в «полі зору» вузла. Для таких випадків як раз призначена так звана модель ON/OFF трафіку в бездротовій сенсорній мережі. Імітаційна модель такої наземної сенсорної мережі складається з декілька просторово розподілених сенсорних вузлів,

розгорнутих в зоні спостереження з метою відстеження за ціллю з випадковою траєкторією руху. Дальність виявлення кожного сенсорного вузла визначається його чутливістю. Перевірка на знаходження цілі всередині зони досяжності кожного вузла проводиться за таймером Δt . Така ON/OFF модель трафіку передбачає, що вузли датчиків передають пакети, коли ціль знаходиться в зоні відстеження (стан ON), і припиняють їх передачу, коли ціль залишає зону досяжності (стан OFF). Таку модель трафіку можна розглядати як послідовність періодів включення і виключення (рис.6.11).

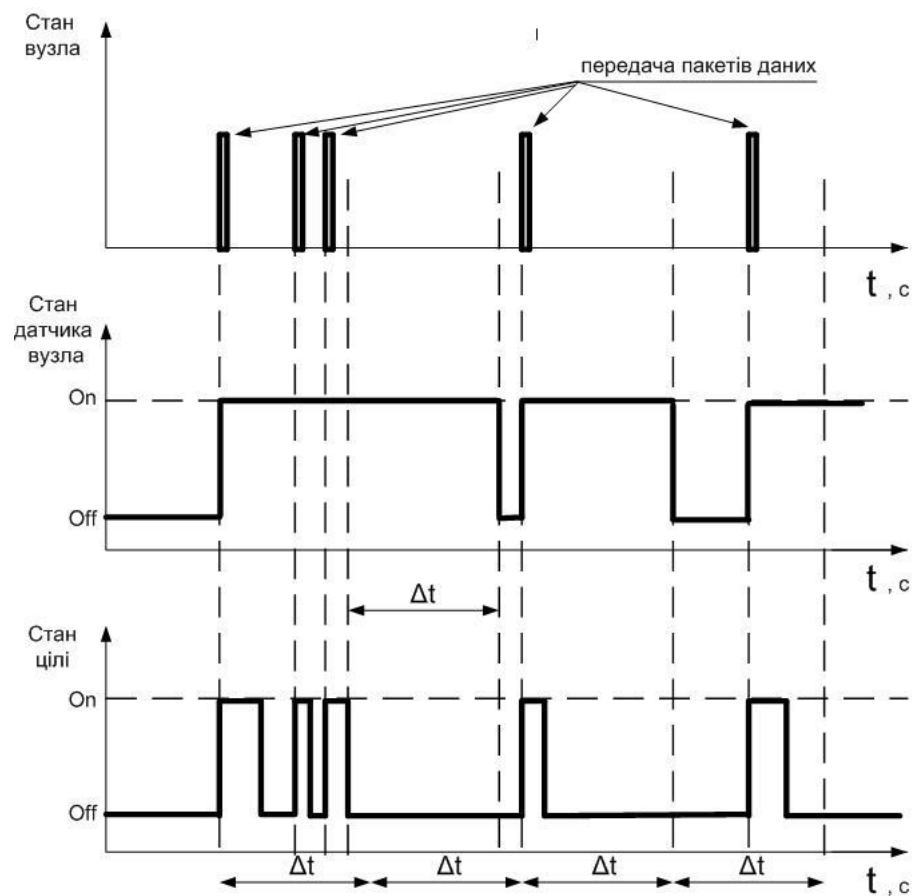


Рисунок 6.11. Модель ON/OFF трафіку за таймером Δt

Стан ON зберігається до закінчення таймера включення. Якщо до закінчення таймера увімкнення надходить інший пакет, таймер увімкнення запускається повторно. Якщо пакет не доставляється під час вікна таймера включення, стан OFF вимикається.

Вищевказане щодо трафіку IoT-пристроїв описує нестационарні здібності, які моделюються стаціонарними потоками зі складною структурою та які мають властивість самоподібності. Властивість самоподібності впливає на своєчасність обробки трафіку, що циркулює в реальних IoT-мережах. При цьому показником наявності цієї властивості в вхідному потоці є коефіцієнт Херста (H), який приймає значення в діапазоні

$$H \in (0,5;1]. \quad (6.21)$$

Потік з розподілом Пуассона, який був застосований раніше, не володіє силою само подібності, тому для отримання більш точних оцінок якості обслуговування показників реального трафіку від IoT-пристроїв необхідно розробити адекватні моделі, які б враховували властивість самоподібності. В якості таких моделей реального трафіку, що дозволяє більш адекватно описати властивість самоподібності, можливо застосувати потік з розподілом за Парето значення часового інтервалу між надходженням регулярних запитів. При використанні потоку з розподілом за Парето в якості моделі трафіку від IoT-пристроїв діапазон значень параметра форми

$$\alpha \in (2;3] \quad (6.22)$$

є найбільш актуальним. Такі значення параметра α розподілу за Парето дозволяють описати складну структуру трафіку за рахунок формування великих значень середньоквадратичного відхилення інтервалу часу між моментами надходження наступних запитів від IoT-пристроїв.

Функція розподілу Парето задається виразом:

$$F(\tau_{par}) = 1 - \left(\frac{k}{\tau_{par}}\right)^\alpha, \quad k > 0, \alpha > 0, \tau_{par} > k, \quad (6.23)$$

де τ_{par} - інтервал часу між надходженням запитів з розподілом Парето;
 k - коефіцієнт масштабу;
 α - параметр форми розподілу Парето.

Коефіцієнт Херста є показником наявності самоподібності в трафіку, що, крім усього іншого, вказує на наявність структурної складності в трафіку. Також існує залежність між коефіцієнтом Херста H і параметром форми α розподілу Парето:

$$\alpha = 4 - 2 \cdot H. \quad (6.24)$$

Оцінку рівня зниження показника своєчасності обслуговування трафіку від IoT-пристроїв в комутаторі можна здійснити також на основі імітаційного моделювання. Оцінка якості обслуговування цього потоку буде проводитися шляхом його нормалізації по відношенню до показників якості обслуговування потоку з розподілом Пуассона. Для моделювання був застосований програмний засіб GPSS World (General Purpose Simulation System). Змінними параметрами цього потоку є значення параметра форми α , масштабний коефіцієнт k розподілу Парето, навантаження сервісного пристрою ρ .

За розробленою імітаційною моделлю типу Pa/M/1/ ∞ був досліджений час затримки при обслуговуванні потоку запитів з розподілом Парето на маршрутизаторі з експоненціальним часом обслуговування. Текст моделі, складений в середовищі GPSS World, представлений в Додатку Е, результати моделювання представлені у Додатку Ж.

В ході моделювання були введені наступні обмеження:

а) обсяг буфера $W = \infty$ (черга необмеженої довжини);

б) час обробки запиту в маршрутизаторі: $b = \frac{1}{\mu} = 1$;

в) значення масштабного коефіцієнта розподілу Парето: $k \in [0,1;1]$;

г) значення параметра форми розподілу Парето: $\alpha \in (2;3]$.

В ході моделювання було помічено, що за результатами моделювання майже 90% отриманих значень часового інтервалу між запитами дорівнювали 1..3 мс (див. Додаток Ж, виділене блакитним кольором).

При цьому максимальна кількість запитів, що очікують обслуговування в буфері W , дорівнювало 8 (див. Додаток Ж, виділене жовтим кольором). Це пов'язано з тим, що мінімальне значення часового інтервалу між вхідними запитами визначається коефіцієнтом $k=1$. Для оцінки рівня зниження своєчасності обслуговування трафіку у IoT-комутаторі за показником часу затримки була розроблена імітаційна модель $Pa/M/1/\infty$ (Додаток Е), яка була досліджена на предмет масштабованості при різних значеннях параметрів $\alpha \in (2;3]$ і $k \in [0,1;1]$. Результат одного прогону моделі наданий у Додатку Ж, узагальнені результати дослідження представлені в табл.6.4.

Таблиця 6.4

Кількісна оцінка рівня зниження своєчасності обслуговування трафіку зі складною структурою

		Параметр форми, α						
		2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
Коефіцієнт масштабу, k	1	1,09	1,03	0,97	0,93	0,89	0,86	0,81
	0,9	1,14	1,07	1,01	0,96	0,91	0,88	0,85
	0,8	1,20	1,13	1,06	1,00	0,95	0,91	0,87
	0,7	1,31	1,31	1,14	1,07	1,02	0,97	0,92
	0,6	1,49	1,38	1,29	1,21	1,14	1,12	0,97
	0,5	1,86	1,72	1,61	1,53	1,46	1,39	1,39

У табл.6.4 значення часу затримки запитів від IoT-пристроїв з розподілом Парето представлені в нормалізованому вигляді по відношенню до значень часу затримки запитів потоку з експоненціальним розподілом за Пуассоном при однаковому часі обслуговування запитів для цих потоків.

При дослідженні імітаційної моделі M/M/1/∞ були отримані значення часу затримки запитів для потоку з експоненційним розподілом (текст імітаційної моделі, складеної в середовищі GPSS World, представлений у Додатку Г),

тобто $\frac{T_{затр\text{Парето}}}{T_{затр\text{Пуассона}}}\Big|_{\alpha=2,3;k=1}=0,97$. В ході моделювання були введені наступні

обмеження:

а) обсяг буфера $W=\infty$;

б) час обробки запиту в маршрутизаторі: $b = \frac{1}{\mu} = 1$;

Після аналізу результатів за табл.6.4 виявлено, що кілька пар значень (α ; k) відповідають одному і тому ж значенню часового інтервалу між надходженням запитів з розподілом Парето до них, наприклад (2,2; 0,9) та (2,4;0,7). Однак чим менше значення параметра форми α і масштабного коефіцієнта k , тим більше значення часу затримки. Аналіз результатів моделювання з точки зору співвідношення часу затримки запитів дозволив визначити під область $\alpha \geq 2,3$ & $k < 1$, де розподілений за Парето трафік подається з більш високим ступенем своєчасності, ніж експоненціальний трафік.

6.3.3. Моделі трафіку IoT з обмеженим розподілом часових інтервалів

Особливий інтерес представляють розподіли часових інтервалів між IP-пакетами, які визначаються на кінцевому часовому інтервалі. Інтерес до таких розподілів обумовлений рядом причин:

- по-перше, вимірювання вхідного потоку IP-пакетів показують, що часто бувають тривалі періоди, протягом яких немає «важких хвостів»;
- по-друге, при дотриманні певних умов розподілу на обмежений інтервал можливе отримання верхніх меж на час затримки запитів;
- по-третє, частина IP-пакетів від IoT-пристроїв буде передаватися трафіком з розподілами, для яких сфера визначення справа не обмежена.

Таким чином, модель трафіку може задаватися розподілом вхідного потоку запитів в межах обмеженого інтервалу часу, у т.ч. моделями, які засновані на «безхвостих» дистрибутивах. Такі моделі доцільно використовувати в мережах з комутацією пакетів. В цьому випадку можливо отримати середнє значення часу затримки запитів і коефіцієнт варіації однієї і тієї ж випадкової величини, які перевищують аналогічні значення моделей з «важкими хвостами». За цією моделлю мультисервісний трафік слід розглядати як результат додавання двох компонентів, що представляють потоки IP-пакетів різної природи. Перша складова - трафік людей (користувачем, як правило, стає особистість), друга - трафік речей, створений в ході реалізації концепції IoT. Вивчення другої складової ускладнюється тим, що поки ще складно з необхідною точністю передбачити характер зростання IoT-трафіку. Для комутатора мережі 5G операція додавання IP-пакетів, що надходять з різних джерел, здійснюється в даній моделі в гіпотетичному блоці у вигляді буферної пам'яті на вході вузла комутації, при цьому для обох класів трафіку (людей і речей) повинні бути відомі функції розподілу тривалості інтервалів між моментами надходження запитів. На виході блоку буферної пам'яті буде сформований потік заявок, які повинні бути оброблені вузлом комутації. Для обробки такого потоку необхідно визначити тип розподільчої функції цього потоку і його параметри. Однак це не завжди можливо. Реально визначити вхідні потоки, задані моментами надходження запитів, цілими числами, рівними відношенню поточного часу t до деякого малого періоду Δt . Це дозволить знайти діаметрально протилежні закони надходження запитів для цього потоку, так звані «найкращі» і «гірші». Визначення «найкращий» і «гірший» використовуються для акцентування уваги на наступному факті: характеристики якості обслуговування трафіку при заданому значенні пропускної здатності вузла комутації для розглянутих випадків можна порівняти за допомогою цих прикметників. У запропонованій моделі для «кращого» випадку зберігається буденність, а для «гіршого» порушується

буденність, т.к. в деякі моменти часу може прийти відразу дві заявки. Це відбувається, коли два вхідних потоку неавтоматично «синхронізуються».

6.4. Моделювання процесів в мережах стандарту 5G

Існує три основних види трафіку, на основі реалізованих послуг у мережі 5G :

- потоковий трафік (стрімінгові сервіси) - це передача потоку даних (пакетів), характер якого визначається характеристиками сервісу (голос, відео);

- інтерактивний трафік (інтерактивні сервіси) - цей трафік передбачає передачу даних в обох напрямках, і однією зі сторін є реакція користувача;

- фоновий трафік (фонові сервіси) – в більшості випадків такий трафік не критичний до затримок.

Оскільки генерація абонентського навантаження із параметрами, близькими до реальних є досить складною, в розробленій моделі для спрощення навантаження генерується за пуассонівським законом розподілу (див. Додаток 3, виділено синім кольором) і агрегується з множини сервісів QoS:

- відео дзвінки (5 Мбіт/с);
- онлайн ігри (10 Мбіт/с);
- потокове відео (10 Мбіт/с);
- M2M дані (0.56-1 Мбіт/с);
- телефонні дзвінки (64 Кбіт/с);
- відео на замовлення (1-10 Мбіт/с);
- IoT сервіси для NB-IoT (128 Кбіт/с).

Потоки даних від IoT-пристроїв типів L1..L4 до комутатора додаються з найнижчим пріоритетом обслуговування та з короткими пакетами даних (див. Додаток 3, виділено жовтим кольором).

З функціональних залежностей особливий інтерес представляють

функція розподілу часових інтервалів між пакетами, функція довжин пакетів і характер загасання цих функцій. В зв'язку з тим, що для моделювання не визначена функціональне призначення IoT-мережі, то вхідний потік запитів від IoT-пристроїв буде формуватися за різними інтенсивностями запитів та за різними довжинами пакетів з врахуванням пріоритету обслуговування з характеристиками потоків згідно табл.6.2. У Додатку I зеленим кольором позначені пріоритети обслуговування потоків запитів, жовтим кольором – середня інтенсивність надходження пакетів в секунду, синім – кількість пакетів, яким було відмовлено в обслуговуванні за критерієм перевищення загального часу обслуговування, червоним – коефіцієнт завантаження комутатора та середній час обслуговування одного пакету.

Таблиця 6.2

Характеристики потоків запитів від IoT-пристроїв для моделювання

Пріоритет	Інтенсивність запитів, пак/с	Довжина пакету, байт
1	14809	280
2	14695	90
3	14805	160
4	14843	120
5	14762	80
6	15076	280
7	14767	90
8	15023	160
9 (L1)	14967	80
9(L2)	14781	80
9 (L3)	14935	80
9(L4)	15159	80

6.5. Моделювання мультисервісного трафіку з пристроями Інтернету речей в мережах стандарту 5G

Як правило, більшість потоків трафіку в сучасних мережах агрегуються. В мережі стандарту 5G агрегується дев'ять потоків, які розподілені за пріоритетами, кожен з яких має показники якості обслуговування в цієї мережі. Поток мережі 5G складається з дев'яти потоків, які його утворюють. Це потоки з різних пристроїв (користувачів), потоки різних сервісів (голос, відео, IoT) і т.і. У мережі 5G існує велика кількість черг (буферів) для передачі в вузлах мережі, які впливають один на одного в тому сенсі, що потік, що виходить з однієї черги, надходить в одну або кілька інших черг, можливо, після злиття з частинами інших потоків з якихось інших черг. В запропонованій моделі обслуговування запитів в мережі 5G враховані тільки черзі до комутатора за пріоритетами (див. Додаток I, виділено фіолетовим кольором), де черги з 1 до 8 відповідають стандартним чергам мережі 5G запитів з показниками QFI від 1 до 8, а черги з 9 до 12 створюються запитами від IoT-пристроїв типів від L1 до L4 відповідно.

Властивості IoT-трафіку можуть істотно впливати на якість обслуговування трафіку інших послуг зв'язку, яке також має місце в мережі 5G. Особливості IoT-трафіку, такі як необмежена стійкість автоматичних пристроїв, залежність від зовнішніх факторів, детермінований (регулярний) або квазідетермінований трафік, можуть призвести до зниження якості обслуговування як IoT-трафіку, так і трафіку інших послуг зв'язку. Цей вплив в запропонованій моделі можливо оцінити за розмірами черг за кожним потоком (див. Додаток I, виділено сірим кольором). Параметри потоків для моделювання вибрані так, щоб за кожним потоком були створені черзі за розмірами, які дозволяють здійснити відмову в обслуговуванні за критерієм тривалості обслуговування, але коефіцієнт завантаження маршрутизатора був середнім, щоб не подальшому не враховувати особливості недовантаженого або перевантаженого режиму функціонування комутатора.

Головним за ступенем впливу на виникнення черг чинником є коефіцієнт використання комутатору – відношення середньої інтенсивності вхідного трафіку пристрою λ до середньої інтенсивності передавання пакетів на вихідний інтерфейс μ . Відповідно пакети, що надходять з інтенсивністю λ_i і ($\lambda_i > \mu$), записуються у відповідний i -буфер (чергу № i , $i = \overline{1,12}$).

Для генерації трафіку, характерного для мультисервісних мереж, пропонується використати метод імітаційного статистичного моделювання. На вхід маршрутизатора надходить агрегований потік пакетів з середньою інтенсивністю (λ) (рис.4.9). Моделі за Додатками З та К мають однакові показники агрегованого потоку, але обробка цих потоків різна. За Додатком З показана обробка пакетів запитів від IoT-пристроїв за запропонованим алгоритмом пріоритетного обслуговування, який описаний у розд.4. За Додатком З відповідно пакети, що надходять з інтенсивністю λ_i і ($\lambda_i > \mu$), також записуються у чергу, але перед тим, як потрапити у чергу, вони потрапляють у класифікатор (див. Додаток К, виділено синім кольором), який працює на основі аналізу IP заголовка і залежно від вмісту DSCP поля зчитує DSCP код, який вказує відповідний пріоритет пакета на основі попереднього розрахунку значень критерію для кожного з класів трафіку різної групи користувачів. Після чого класифікатор спрямовує їх у виділені буфери фіксованої різної довжини, у такому разі маршрутизатор міститиме 7 черг для кожної послуги окремо, що забезпечує високу якість обслуговування пріоритетних послуг. Модель такій системи пріоритетного обслуговування мультисервісного трафіку показано у Додатку К. Тривалість пакетів визначалася з звичних на цей час їх розмірів (від 64 до 1500 байтів). Трафік голосу, сигналізації, інтерактивні дані передаються переважно малими розмірами пакетів, а такі послуги, як IPTV, відео-за-запитом, інтернет-дані, відеоконференція, – великими розмірами пакетів, тобто трафік сигналізації – 64 до 99 байт, голос – 100 до 299 байт, інтерактивні дані – 300 до 599 байт, відеоконференція – 600 до 799 байт, IPTV – 800 до 1500 байт, інтернет-дані – 800 до 1500 байт, відео-за-запитом – 800 до 1500 байт.

Інтервали між пакетами згенеровано випадковим чином з параметром Херста $H=0,7$. Управління модельним часом відбувається з використанням методу постійного кроку, з періодом – 1 мс. Пропускна здатність каналу визначена як сума всіх пропускних здатностей, необхідних для кожної з послуг, що становить 20 Мбіт/с. Середня інтенсивність надходження пакетів, що задіяні в процесі моделювання, визначена десятками тисяч. Коефіцієнт завантаження комутатора на рівні близько 70% забезпечує формування черг за кожним потоком розміром в десятки пакетів (див. Додаток І, потік за пріоритетом 1, виділено болотним кольором). Пакети від IoT-пристроїв обслуговуються за загальними правилами, але, якщо розмір черги не дозволяє IoT-запиту бути обслугованим за визначений за кожним типом L1..L4 часом, то формується відмова в обслуговуванні цього запиту (див. Додаток К, виділено жовтим кольором), запит направляється в класифікатор, де подальша його обробка здійснюється за алгоритмом, який описаний у розділі 4. Метою моделювання було оцінити зміни показників якості обслуговування мультисервісного трафіку в зв'язку зі змінами в порядку обслуговування запитів від IoT-пристроїв за запропонованим алгоритмом. Результати моделювання наведені в табл.6.3.

Таблиця 6.3

Результати моделювання обслуговування мультисервісного трафіку

QFI	Швидкісний показник (швидкість обробки), пак/с			Часовий показник (затримка в обслуговуванні), мс			Показник надійності (імовірність втрати пакетів), %		
	було	стало	різниця	було	стало	різниця	було	стало	різниця
1	5,792	5,768	-0,024	11,48	11,52	0,04	5,476	6,009	0,53
2	5,792	5,768	-0,024	13,73	13,85	0,12	0,088	0,077	-0,01
3	5,792	5,768	-0,024	15,87	16,12	0,25	0,176	0,227	0,05
4	5,792	5,768	-0,024	19,10	18,66	-0,43	0,007	0,039	0,03
5	5,792	5,768	-0,024	25,24	26,29	1,05	0,081	0,078	0,00
6	5,792	5,768	-0,024	32,21	31,95	-0,27	0,020	0,000	-0,02
7	5,792	5,768	-0,024	37,41	39,56	2,15	0,007	0,000	-0,01
8	5,792	5,768	-0,024	47,10	47,37	0,26	0,140	0,000	-0,14
9 (L1)	5,792	5,768	-0,024	59,07	55,78	-3,29	0,220	0,038	-0,18

9 (L2)	5,792	5,768	-0,024	59,48	56,18	-3,31	0,216	0,196	-0,02
9 (L3)	5,792	5,768	-0,024	57,55	55,02	-2,53	0,087	0,038	-0,05
9 (L4)	5,792	5,768	-0,024	58,88	59,88	1,00	0,125	0,267	0,14

Показник швидкості обробки пакетів визначався за середнім часом обробки пакетів у комутаторі (див. Додаток І та Додаток Л, виділено червоним кольором), розподілу щодо кожним потоком результати моделювання не визначають. Затримка в обслуговуванні визначалася як сума часу знаходження запиту у черзі та часу обробки цього запиту у комутаторі, наприклад, для потоку за QFI1 (див. Додаток І, червоний колір) середній час обробки пакету у комутаторі 5,792 мс, а середній час очікування у черзі дорівнює 5,689 мс (див. Додаток І, червоний колір), що в сумі складає 11,48 мс. Імовірність втрати пакетів визначене як відношення кількості втрачених пакетів потоку до загальної кількості пакетів цього потоку, наприклад, для потоку за QFI1 (див. Додаток Л, жовтий колір) загальна кількість згенерованих пакетів складає 2463, а кількість втрачених пакетів дорівнює 148, тому їх відношення складає $148/2463*100\%=6,009\%$.

За табл.6.3 видно, що загальна картина щодо обробки запитів різних класів на одному комутаторі після введення модифікованого алгоритму обробки IoT-запитів не погіршилися, навпаки, більшість показників були покращені. Загальний швидкісний показник поліпшився за рахунок збільшення обробленої кількості коротких запитів від IoT-пристроїв, які за звичайним порядком та за нізшим пріоритетом звично очікували в черзі на обробку. Часовий показник був поліпшений також за рахунок того, що збільшилася кількість оброблених коротких запитів від IoT-пристроїв, які замість обробки за 9 пріоритетом вже оброблялися за вищими, та за рахунок зменшення довжини черг за потоками. Більшість часових показників потоків були покращені незначно, але потоки L1..L3 за рахунок підвищення пріоритету обробці запитів цих типів були покращені вже значно. Показник

потоків L4 практично не претерпів змін, т.к. за модифікованим алгоритмом запити цього потоку пріоритетність не змінювали та оброблялися загальним порядком. Ймовірність втрати пакетів практично не претерпіла змін, але за потоками, де зміни сталися, запити від IoT-пристроїв, де очікувалася відмова в обслуговуванні, були успішно оброблені за вищими пріоритетами.

Таким чином, за модифікованим алгоритмом обробки запитів від IoT-пристроїв в мережі стандарту 5G слід очікувати підвищення середньої швидкості обробки пакетів на 0,3 %, зменшення часу затримки запитів від IoT-пристроїв на їх обробку на $(0,83 \div 5,57)\%$ при погіршенні цього показника за іншими потоками агрегованого трафіку, ймовірність втрати пакетів від IoT-пристроїв типів L1..L3 зменшилася на $(0,02 \div 0,18)\%$.

За результатами моделювання визначено, що поведінка черг є імовірнісним процесом, на який впливає багато чинників, особливо при складних алгоритмах обробки черг, що використовують пріоритети. Надалі планується впровадити розроблену методику розрахунку відносного значення пріоритету послуг у мережевих пристроях ущільнення трафіку, визначення особливостей реалізації методики в складі систем керування трафіком мереж, побудованих за різними мережевими технологіями.

Всі отримані показники якості обслуговування відповідають класам якості для сервісів M2M/IoT пристроїв відповідно до табл.4.1 та показникам якості стандарту LTE/5G відповідно до табл.1.2.

6.6. Особливості обслуговування трафіку з пристроями тактильного інтернету в мережах стандарту 5G

Під пристроями тактильного інтернету слід рахувати IoT-пристрої, до яких пред'являються самі жорсткі вимоги щодо якості обслуговування. Результати моделювання показали, що майже з середнім завантаженням обладнання мережі 5G обслуговування загальним порядком (з найнижчим пріоритетом) запитів від IoT-пристроїв призведе до значних черг в

обслуговуванні цих запитів, що унеможливило забезпечення потребуємих показників якості. Значну кількість обробки запитів слід здійснювати в IoT-мережі до передачі запитів в мережу стандарту 5G. Трафік ТІ значно буде впливати на якість обслуговування інших мультисервісних потоків.

При виборі мережевих рішень для спільного обслуговування регулярного IoT-трафіку і трафіку інших сервісів слід враховувати більшу «толерантність» IoT-трафіку до втрат, в той час як випадкові потоки, зокрема трафік ТІ, більш схильні до втрат при спільному обслуговуванні.

6.7. Висновки до розділу 6

Дослідження, проведені в цьому розділі, надали змогу отримати наступні результати.

1. Аналіз тенденцій розвитку інфокомунікаційних систем показує, що частка IoT-трафіку в перспективних мережах зв'язку значно зростає, що призведе до його впливу на якість обслуговування. Беручи до уваги той факт, що трафік в мережі буде містити трафік ТІ, цей вплив може мати істотний вплив на якість його обслуговування.
2. Запропонована модель обслуговування мультисервісного трафіку є універсальною та може бути застосована для моделювання будь-яких потоків в мережі стандарту 5G.
3. В якості прикладу при моделюванні була розглянута мережа ZigBee, яка спроможна працювати за топологією mesh (сітка), особливим випадком якої може бути з'єднання за топологією «точка-точка» (peer-to-peer, P2P), «ланцюг», «зірка», «дерево» або «кільце», а також за цією технологією можливо розглянути варіант багаторангової мережі, що не є обов'язковим за іншими технологіями..
4. У моделях трафіку, що генеруються пристроями IoT доцільно використовувати розподіл Пуассона.
5. Кількість кінцевих IoT-пристроїв типу ZigBee в найкращому випадку

складає десятки одиниць максимально, що для більшості сфер застосувань є достатнім. Для літакової сенсорній мережі потрібно застосовувати пакети довжиною сотні біт і інтенсивність потоків розміром менш одиниці пакетів в секунду, щоб забезпечити сенсорне поле розміром тисячі одиниць.

6. Застосування модифікованого алгоритму обробки запитів від IoT-пристроїв в мережі стандарту 5G призвели до підвищення середньої швидкості обробки пакетів на 0,3 %, зменшення часу затримки запитів від IoT-пристроїв на їх обробку на $(0,83 \div 5,57)\%$ при погіршенні цього показника за іншими потоками агрегованого трафіку, ймовірність втрати пакетів від IoT-пристроїв типів L1..L3 зменшилася на $(0,02 \div 0,18)\%$.

7. При виборі мережевих рішень для спільного обслуговування регулярного IoT-трафіку і трафіку інших сервісів слід враховувати більшу «стійкість» IoT-трафіку до втрат, в той час як випадкові потоки, зокрема трафік ТІ, більш схильні до втрат при спільному обслуговуванні.

Основні наукові та практичні результати розділу опубліковані в роботах [1,34,184,188,191,192,196,197,198,199,200].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна й важлива проблема розроблення теоретичних і методологічних основ адаптації інформаційних технологій інтернету речей в мобільній мережі зв'язку стандарту 5G.

Дисертація містить такі основні теоретичні й практичні результати:

1. На основі виконаного аналізу методологічних підходів до адаптації інформаційних технологій інтернету речей в мобільній мережі зв'язку стандарту 5G показано, що ці питання адаптації не до кінця розроблені та потребують подальшого розвитку.

2. Оцінювання забезпечення якості обслуговування в мережі Інтернету речей можливо за допомогою створеної автором імітаційної моделі, для якої розроблена структура, математичний апарат та показані результати чисельного моделювання.

3. Основні результати дисертаційної роботи можна класифікувати згідно з їх теоретико-концептуальною, алгоритмічно-прикладною і реалізаційно-прикладною значимістю..

В теоретико-концептуальному плані одержані такі результати:

3.1. Виконаний системний аналіз основних показників якості обслуговування в мережі Інтернету речей та методологічних підходів до їх визначення.

3.2. Визначена структура рівня користувача в мобільній мережі зв'язку стандарту 5G.

3.3. Здійснена оцінка проблем управління якістю обслуговування Інтернету речей в мобільних мережах п'ятого покоління.

3.4. Запропонована концептуальна модель мережі стандарту LTE/5G з наданням сервісів Інтернету речей.

3.5. Запропонована концептуальна модель мережі Інтернету речей з адаптивним управлінням якістю.

3.6. Вдосконалена сервісна модель обслуговування запитів від вузлів

БСС при невідомих координатах їх розташування, яка може бути представлена у вигляді системи черг з виходом заявок з черги (з обмеженим часом очікування).

3.7. Вдосконалена модель для рою безпілотних літальних апаратів, що відрізняється від відомих тим, що рій БПЛА представлений у вигляді мережі черги, а основною характеристикою моделі є середня тривалість передачі інформації між елементами рою.

3.8. Розроблений алгоритм роботи координатора польоту ЛСМ щодо зміни маршрутизатора, який відрізняється від відомих тим, що враховує необхідність своєчасної заміни маршрутизатора для забезпечення збереження отриманих даних та для продовження польоту за маршрутом.

3.9. Запропонований метод інтелектуального керування розподілом ресурсів мережі стандарту LTE/5G з наданням сервісів Інтернету речей.

На основі наведених теоретично-концептуальних результатів з метою забезпечення якості обслуговування між пристроями Інтернету речей в мережах стандарту LTE/5G одержані такі алгоритмічно-прикладні результати:

3.10. Розроблена імітаційна модель мережі стандарту LTE/5G з надання сервісів Інтернету речей.

3.11. Розроблена математична модель забезпечення якості обслуговування в мережі Інтернету речей.

3.12. Запропонований алгоритм білінгової системи мережі стандарту LTE/5G з наданням сервісів Інтернету речей.

Прикладні результати дисертаційної роботи полягають у застосуванні запропонованих методик, моделей, алгоритмів:

3.13. Представлені результати чисельного моделювання функціонування пристроїв Інтернету речей в мережах стандарту LTE/5G.

3.14. Представлені імовірно-часові характеристики процесу передавання сповіщень від пристроїв Інтернету речей в мережах стандарту LTE/5G.

4. Для вирішення проблеми розроблення комплексної методики забезпечення якості обслуговування між пристроями Інтернету речей в мережах стандарту LTE/5G в дисертації широко використовуються принципи, методи і засоби системного аналізу, структурного, математичного і імітаційного моделювання, комбінаторики, теорії ймовірностей, елементи штучного інтелекту.

5. Достовірність одержаних результатів обґрунтована застосуванням методології системного аналізу, коректними перетвореннями в рамках моделей комбінаторики, теорії ймовірностей, штучного інтелекту. Адекватність моделей підтверджується експериментальними дослідженнями і результатами впровадження розроблених методик, пріоритетом публікації результатів в провідних наукових журналах і збірниках, схваленням фахівців на наукових конференціях і семінарах.

6. Результати дисертації рекомендовані для подальшого застосування при створенні вискоелективних систем Інтернету речей в мережах стандарту LTE/5G на етапі їх проектування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абдураманов Р.А., Хлапонін Ю.І., Намір Хашім Касім. Метод квантильної регресії для прогнозування стану телекомунікаційних мереж. Вісник інженерної академії. – 2017. – Вип. 3 – С. 32-37
2. Абрамов В. О. Захищені кабельні інтерфейси сенсорних мереж інтернету речей [Електронний ресурс] // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. – 2019. – № 1. – С. 73-82. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cest_2019_1_9 (дата звернення: 01.12.2021)
3. Абрамов В. О. Методичні аспекти викладання дисциплін напрямку «інтернет речей» [Електронний ресурс] / В. О. Абрамов, О. С. Литвин // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. – 2018. – № 1. – С. 73-85. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cest_2018_1_10 (дата звернення: 01.12.2021)
4. Алгоритм оброблення сигналів для IoT пристроїв із використанням OFDM-модуляції / Г. О. Гринкевич [та ін.] // Зв'язок. – 2019. – № 6. – С. 42-46
5. Алексіна Л. Т. Дослідження технологій інтернету речей / Л. Т. Алексіна, О. О. Шевченко // Зв'язок. – 2019. – № 4. – С. 24-26
6. Аль-Хафаджі Ахмед Валід. Розроблення методики PSMECA аналізу при застосуванні IoT компонентів у системах фізичної безпеки [Електронний ресурс] // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2018. – № 3. – С. 63–73. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2018_3_9 (дата звернення: 01.12.2021)
7. Амин Раад Джихад Алалван. Применение Bluetooth-технологии в интернете вещей [Электронный ресурс] / Амин Раад Джихад Алалван, Енин В. Д. // Междун. журн. гуманитар. и естеств. наук. – 2018. – № 5-1. – С. 179-183. – URL: <https://cutt.ly/todlO1H> (дата звернення: 01.12.2021)
8. Анализ требований при разработке системы управления прикладными задачами IoT / А. П. Бондарчук [та ін.] // Телекомунікаційні та інформ. технології. – 2018. – № 1. – С. 40-46. – Відомості доступні також в інтернеті: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt_2018_1_7 (дата звернення: 01.12.2021)
9. Аналіз апаратної підтримки криптографії у пристроях інтернету речей / Я. Совин [та ін.] // Безпека інформації. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 36-48. – Бібліогр.: 34 назв. – Відомості доступні також в інтернеті: <https://cutt.ly/7ppS3yi> (дата звернення: 01.12.2021)
10. Аналіз вимог до проектування хмарної платформи для інтернету речей // Зв'язок. – 2019. - № 6. – С. 8-11.
11. Аналіз ефективності мережі LTE – 2018. – URL: <https://thelib.info/tehnologii> (дата звернення: 16.12.2021)
12. Аналіз загроз під час упровадження технології IMT-2020/5G / Ю. І. Катков [та ін.] // Зв'язок. – 2019. – № 2. – С. 3-11. – Бібліогр.: 15 назв.
13. Аналіз частотного ресурсу мережі LTE в Україні – 2019. – URL:

- <https://onat.edu.ua/wp-content/uploads/2019/05/Додатк.-секція-конференції.pdf> (дата звернення: 13.11.2021)
14. Артеменко М. Ю. Нейронні мережі та їх застосування в телекомунікаційних системах / М. Ю. Артеменко, Л. Н. Беркман, С. В. Толюпа // Радіотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 134. – С. 45–53.
 15. Бабаев Н. В. Описание методики оценки времени автономной работы конечных устройств стандартов Cellular IoT [Электронный ресурс] / Бабаев Н. В., Мошков В. В. // Экономика и качество систем связи. – 2019. – № 3 (13). – С. 26-35. – URL: <https://cutt.ly/eigjqjE> (дата звернення: 01.12.2021)
 16. Балабанов В. И. Перспективы внедрения элементов технологий «Интернета вещей» в растениеводстве [Электронный ресурс] / Балабанов В. И., Ищенко С. А., Романенкова М. С. // Вестн. Моск. гос. агроинж. ун-та им. В. П. Горячкина. – 2019. – № 4. – С. 13-18. – URL: <https://cutt.ly/kyQbTzf> (дата звернення: 01.12.2021)
 17. Баранов О. А. Интернет речей (IoT) і блокчейн [Електронний ресурс] // Інформація і право. – 2018. – № 1. – С. 59-71. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Infpr_2018_1_8 (дата звернення: 01.12.2021)
 18. Баранов О. А. Интернет речей і освіта // Интернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання : монографія / О. А. Баранов. – 2-ге вид. – Харків, 2018. – Т. 1: Сфери застосування, ризику і бар'єри, проблеми правового регулювання. – С. 81-89.
 19. Баранов О. А. Интернет речей і охорона здоров'я // Интернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання : монографія / О. А. Баранов. – 2-ге вид. – Харків, 2018. – Т. 1: Сфери застосування, ризику і бар'єри, проблеми правового регулювання. – С. 24-36
 20. Баранов О. А. Интернет речей і промисловість // Интернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання : монографія / О. А. Баранов. – 2-ге вид. – Харків, 2018. – Т. 1: Сфери застосування, ризику і бар'єри, проблеми правового регулювання. – С. 36-64
 21. Баранов О. А. Интернет речей і рітейл // Интернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання : монографія / О. А. Баранов. – 2-ге вид. – Харків, 2018. – Т. 1: Сфери застосування, ризику і бар'єри, проблеми правового регулювання. – С. 89-92
 22. Баранов О. А. Интернет речей і сільське господарство // Интернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання : монографія / О. А. Баранов. – 2-ге вид. – Харків, 2018. – Т. 1: Сфери застосування, ризику і бар'єри, проблеми правового регулювання. – С. 65-71
 23. Баранов О. А. Интернет речей і транспорт // Интернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання : монографія / О. А. Баранов. – 2-ге вид. – Харків, 2018. – Т. 1: Сфери застосування, ризику і бар'єри, проблеми правового регулювання. – С. 92-96
 24. Баранов О. А. Интернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання : монографія. Т. 1: Сфери застосування, ризику і

- бар'єри, проблеми правового регулювання / О. А. Баранов. – 2-ге вид. – Харків, 2018. – 344 с. – Бібліогр.: с. 324-342 (316 назв).
25. Баранов О. А. Проблеми використання розумних контрактів // Інтернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання : монографія / О. А. Баранов. – 2-ге вид. – Харків, 2018. – Т. 1: Сфери застосування, ризику і бар'єри, проблеми правового регулювання. – С. 290-319
 26. Бешлей Г. В. Моделі та метод оптимального розподілу мережних ресурсів в програмно-конфігурованих гетерогенних мережах мобільного зв'язку: дис. ... доктора філософії: спец. 172. Львів: НУ «Львівська політехніка». - 2021. - 240 с.
 27. Бізнес для розумних міст: в Україні вперше відбувся унікальний Міжнародний ЕКСПО-конгрес <https://hochu.ua/cat-razvitie/article-91957-biznesdlya-rozumnih-mist-v-ukrayini-vpershe-vidbuvsya-unikalniy-mizhnarodniy-ekspokongres> (дата звернення: 01.12.2021)
 28. Бортник К. Я. Інтернет речей та як він змінить наше життя у майбутньому [Електронний ресурс] / К. Я. Бортник, О. В. Ольшевський, В. Ю. Пащук // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, вироб. – 2018. – № 30/31. – С. 14-18. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kitonv_2018_30-31_5 (дата звернення: 01.12.2021)
 29. Брайчевський С. М. Зворотні зв'язки в системах Інтернету речей з елементами штучного інтелекту [Електронний ресурс] // Інформація і право. – 2019. – № 2. – С. 32-39. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Infpr_2019_2_6 (дата звернення: 01.12.2021)
 30. Брайчевський С. М. Проблема персональних даних в системах Інтернету речей з елементами штучного інтелекту [Електронний ресурс] // Інформація і право. – 2019. – № 4. – С. 61-67. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Infpr_2019_4_9 (дата звернення: 01.12.2021)
 31. Брайчевський С. М. Резонансні явища в системах Інтернету речей [Електронний ресурс] // Інформація і право. – 2019. – № 1. – С. 68-73. – URL: <https://cutt.ly/mppKSzA> (дата звернення: 01.12.2021)
 32. Бугаєнко Ю. М. Вибір алгоритму машинного навчання для застосування при обробці даних в підмережі IoT [Електронний ресурс] / Ю. М. Бугаєнко, В. В. Курдеча // Проблеми телекомунікацій : зб. матеріалів XII міжнар. наук.-техн. конф. (16-20 квіт. 2018 р., м. Київ). – К., 2018. – URL: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/131547/127626> (дата звернення: 01.12.2021)
 33. Вергун А. І. Розробка модифікованої архітектури мережі інтернету речей із використанням LP-WAN // Зв'язок. – 2019. – № 4. – С. 15-17
 34. Власенко Мирослава, Намір Хашім Касім. Адаптивний захист інформації // IV Міжнародна науково-практична конференція “Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем” (PCSITS) 15-16 квітня 2021 року, тези доп. – К., С.115-116
 35. Волосян Д. О. Програмні засоби оброблення інформації для Інтернету речей [Електронний ресурс] // Електронна та Акустична Інженерія. –

2019. – Т. 2, № 4. – С. 52-57. – URL: <https://cutt.ly/hpqhzmD> (дата звернення: 01.12.2021)
36. Гіоргізова-Гай В. Ш. Шлюз у системі інтернету речей [Електронний ресурс] / Гіоргізова-Гай В. Ш., Шеренковський А. О. // Вчені зап. ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Техн. науки. – 2019. – Т. 30 (69), ч. 1, № 1. – С. 31-37. – URL: <https://cutt.ly/dpoJJpm> (дата звернення: 01.12.2021)
37. Гненний А. П. Актуальні механізми ідентифікації особистості в інтернеті речей [Електронний ресурс] / А. П. Гненний, Ю. Г. Гордієнко // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, вир-во. – 2018. – № 30/31. – С. 19-25. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kitonv_2018_30-31_6 (дата звернення: 01.12.2021)
38. Гненний А. П. Інтернет речей як головний чинник впровадження ІТ-технологій на сучасному підприємстві [Електронний ресурс] / А. П. Гненний, Ю. Г. Гордієнко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технол. процесах. – 2018. – № 1. – С. 94-98. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vott_2018_1_14 (дата звернення: 01.12.2021)
39. Гордієнко С. Г. Методологічні аспекти дослідження Інтернету речей // Інтернет речей: проблеми правового регулювання та впровадження : матеріали ІІ наук.-практ. конф., 29 листоп. 2018 р., м. Київ / Ком. ВР України з питань інформатизації та зв'язку [та ін.] ; упоряд.: В. М. Фурашев, С. О. Дорогих. – К., 2018. – С. 20-29. – Відомості доступні також в інтернеті: <https://cutt.ly/eumkv4n> (дата звернення: 01.12.2021)
40. Горизонт 2020. Міністерство освіти і науки України. [Електронний ресурс] / МОНУ // «Горизонт 2020». URI: <https://mon.gov.ua/ua/tag/gorizont-2020> (дата звернення: 01.12.2021)
41. Гребініченко М. В. Кластерний аналіз для зменшення навантаження в мережах IoT [Електронний ресурс] / М. В. Гребініченко, Ю. М. Бугаєнко // Перспективи телекомунікацій : матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф. (15-19 квіт. 2019 р., м. Київ). – К., 2019. – URL: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/168473/168284> (дата звернення: 01.12.2021)
42. Грудзинський Ю. Є. Побудова сенсорної mesh-мережі промислового інтернету речей на основі технології Bluetooth 4.2 [Електронний ресурс] / Ю. Є. Грудзинський, Я. Ю. Лукомський // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучас. технологіях. – 2018. – № 16. – С. 107-111. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpinrct_2018_16_18 (дата звернення: 01.12.2021)
43. Гаркуша С. В. Модель распределения блоков планирования в нисходящем канале связи технологии LTE // Грузинский электронный научный журнал: Компьютерные науки и телекоммуникации, 2013. – Вып. 3(39). – С. 76-94.
44. Гузов А. Г. Інтернет речей для управління MICROGRID [Електронний ресурс] / А. Г. Гузов, В. В. Курдеча // Перспективи телекомунікацій : матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф. (15-19 квіт. 2019 р., м. Київ). – К., 2019. – URL: <https://cutt.ly/SpqhsRK> (дата звернення: 01.10.2022)

45. Давидюк А. М. Виклики та проблематика в промисловому «Інтернеті речей» [Електронний ресурс] / А. М. Давидюк, В. В. Курдеча // Проблеми телекомунікацій : зб. матеріалів XII міжнар. наук.-техн. конф. (16-20 квіт. 2018 р., м. Київ). – К., 2018. – URL: <https://cutt.ly/sppZxua> (дата звернення: 01.10.2022)
46. Будіман Еді, Окі Wicaksono. Вимірювання якості обслуговування послуг мобільного інтернету [Електронний ресурс] // 2-а Міжнародна конференція з науки в інформаційних технологіях (ICSITech) (26-27 жовтня 2016 р., Баліпапан, Індонезія). – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7852652> (дата звернення: 01.10.2022)
47. Давидюк А. М. Забезпечення цілісності даних в мережах промислового «Інтернету речей» [Електронний ресурс] / А. М. Давидюк, В. В. Курдеча // Перспективи телекомунікацій : матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф. (15-19 квіт. 2019 р., м. Київ). – К., 2019. – URL: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/168188/167954> (дата звернення: 01.10.2022)
48. Давидюк А. М. Модифікований метод управління інфраструктурою мережі промислового Інтернету речей / А. М. Давидюк, В. В. Курдеча [Електронний ресурс] // Перспективи телекомунікацій : зб. матеріалів XIV міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 13-17 квіт. 2020 р.) / Ін-т телекомунікац. систем та НДІ телекомунікацій КПІ ім. Ігоря Сікорського. – К., 2020. – URL: <https://cutt.ly/NppZPVH> (дата звернення: 01.10.2022)
49. Дідич З. «Інтернет речей»: можливості та перспективи їх використання у сільському господарстві України [Електронний ресурс] // Аграрна економіка. – 2018. – Т. 11, № 1/2. – С. 88-93. – URL: <https://cutt.ly/DpoLEwM> (дата звернення: 01.10.2022)
50. Дідушко Д. М. Імплементация интернет речей в галузях світової економіки // Формування ринк. відносин в Україні. – 2018. – № 11. – С. 42-48. – Бібліогр.: 6 назв.* – Відомості доступні також в інтернеті: http://nbuv.gov.ua/UJRN/frvu_2018_11_8 (дата звернення: 01.10.2022)
51. Дмитренко Ю. Интернет вещей // Бизнес и безопасность. – 2015. – № 6. – С. 45-48
52. Довгаль В. А. Интернет Вещей: концепция, приложения и задачи [Электронный ресурс] / Довгаль В. А., Довгаль Д. В. // Вестн. Адыг. гос. ун-та. Серия 4: Естеств.-мат. и техн. науки. – 2018. – № 1 (212). – С. 129-135. – URL: <https://cutt.ly/voeEsGv> (дата звернення: 01.10.2022)
53. Домрачева К. О. Аналіз технологій та стандартів зв'язку для мережі IoT / К. О. Домрачева, Н. М. Довженко, В. В. Дмитренко // Наук. зап. Укр. наук.-дослід. ін-ту зв'язку. – 2019. – № 3. – С. 54-62
54. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ: в 2 т./ Н. Дрейпер, Г. Смит. – Москва: Финансы и статистика, 1986.
55. Дугінець Г. В. Концепція «інтернет речей» у глобальному виробництві: досвід для України // Економіка і регіон. – 2018. – № 1 (68). – С. 127-133. – Бібліогр.: 20 назв. – Відомості доступні також в інтернеті:

- <https://cutt.ly/Tprpqsp> (дата звернення: 01.10.2022)
56. Евгеньев Г. Б. Индустрия 5.0 как интеграция Интернета знаний и Интернета вещей [Электронный ресурс] // Онтология проектирования. – 2019. – № 1 (31). – С. 7-23. – URL: <https://cutt.ly/Xow7WQl> (дата звернення: 01.10.2022)
 57. ETCETERA. Україну підключають до «Інтернету речей»: навіщо це потрібно? [Електронний ресурс] URL: <https://uk.etcetera.media/ukrayinupidklyuchayut-do-internetu-rechey-navishho-tse-potribno.html> (дата звернення: 01.10.2022)
 58. Жуков І. А. Оцінювання інтенсивностей первинних інформаційних потоків, згенерованих абонентами інтернету речей [Електронний ресурс] / Жуков І. А. [та ін.] // Проблеми інформатизації та управління. – Т. 1, №. 61. – С. 22-29. – URL: <https://cutt.ly/Npqhtl5> (дата звернення: 01.10.2022)
 59. Журавель В. І. Інтернет речей у системі медичної допомоги: можливості та безпека [Електронний ресурс] / В. І. Журавель, Т. Ю. Ткачук, Д. С. Борковський // Актуальні проблеми клініч. та профілакт. медицини. – 2019. – Т. 3, № 1/2. – С. 5-12. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/akprkl_2019_3_1-2_3 (дата звернення: 01.10.2022)
 60. Журавська І. М. IoT-мережа на базі Bluetooth-модулів для автоматизованого керування споживанням енергоресурсів [Електронний ресурс] // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, вир-во. – 2018. – № 30/31. – С. 37-44. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kitonv_2018_30-31_9 (дата звернення: 01.10.2022)
 61. Забезпечення безпеки передачі інформації в LTE – 2018. – URL: <http://conferenc.its.kpi.ua/2018/paper/download/12654/6106> (дата звернення: 28.11.2021)
 62. Зайченко Д. С. Повышение устойчивости передачи данных с использованием метода LSB в сочетании с генетическим алгоритмом для IoT / Зайченко Д. С., Синева И. С. // Т-Comm - Телекоммуникации и Транспорт. – 2018. – Т. 12, № 12. – С. 43-47. – URL: <https://cutt.ly/vigxysv> (дата звернення: 01.10.2022)
 63. Закон України про інформацію. URL: <http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=2657-12> (дата звернення: 01.10.2022)
 64. Застосування інтернету речей (IoT) за використання протоколу LORAWAN для моніторингу зрошуваних земель [Електронний ресурс] / А. П. Ковальчук [та ін.] // Меліорація і водне госп-во. – 2019. – № 2. – С. 130-139. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mivg_2019_2_16 (дата звернення: 01.10.2022)
 65. Застосування технології LTE у системах реального часу – 2009. – URL: <http://jrnل.nau.edu.ua/index.php/SBT/article/-view/5242/5784> (дата звернення: 05.11.2021)
 66. Захист інформаційних ресурсів у сучасних мережах LTE - 2019. – URL: http://isd.dut.edu.ua/uploads/n_185_66228883.pdf (дата звернення: 16.12.2021)

67. Згуровський М.З. Тернистий шлях до відродження / М.З. Згуровський. – Київ: Генеза, 2010. – 368 с.
68. Зуєв В. Бенчмаркінгова природа впровадження технологій інтернету речей у соціальній роботі / Зуєв В., Антонєць К. // Інтернет речей: проблеми правового регулювання та впровадження : матеріали III наук.-практ. конф., 21 листоп. 2019 р., м. Київ / [упоряд.: В. М. Фурашев, С. О. Дорогих, С. Ю. Петряєв]. – К., 2019. – С. 75-79. – Відомості доступні також в інтернеті: <https://cutt.ly/koehs45> (дата звернення: 01.12.2021)
69. Исследование эффективности технологий LTE/LTE Advanced при проектировании региональных сетей – 2017. – URL: https://sibsutis.ru/upload/bc1/Пояснительная_записка.pdf (дата звернення: 01.12.2021)
70. Іванченко Н. О. Впровадження корпоративних рішень на основі концепції «Інтернет речей» [Електронний ресурс] / Н. О. Іванченко, І. О. Лисенко // Наук. вісн. Ужгород. нац. ун-ту. Серія: Міжнар. екон. відносини та світ. госп-во. – 2018. – Вип. 19 (1). – С. 161-164. – URL: <https://cutt.ly/6ppbNA8> (дата звернення: 01.12.2021)
71. Іванченко Н. О. Розвиток ринку «інтернет речей» в Україні [Електронний ресурс] // Сучасні детермінанти розвитку бізнес-процесів в Україні : II міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. / Київ. нац. ун-т технологій та дизайну. – К., 2018. – С. 211-214. – URL: <https://cutt.ly/CorzJAL> (дата звернення: 01.10.2022)
72. Історія Інтернету речей. З чого все починалося? [Електронний ресурс] // Pereniu.ua : сайт. – URL: <https://cutt.ly/2orzPNT> (дата звернення: 01.10.2022)
73. Капелюшна Т. В. Динаміка розвитку інтернет речей та їх вплив на управління підприємствами / Т. В. Капелюшна, О. М. Згурська // Економіка. Менеджмент. Бізнес. – 2018. – № 3. – С. 79-86. – Бібліогр.: 18 назв.* – Відомості доступні також в інтернеті: http://nbuv.gov.ua/UJRN/esmebi_2018_3_13 (дата звернення: 01.10.2022)
74. Карпова Д. Н. Социотехнический поворот в исследовании цифровизации общества [Электронный ресурс] : [интернет вещей] / Карпова Д. Н., Проскурина А. С. // Власть. – 2020. – № 1. – С. 97-105. – URL: <https://cutt.ly/fow5sBr> (дата звернення: 01.10.2022)
75. Ким Е. О. Интернет вещей: перспективы применения [Электронный ресурс] / Ким Е. О., Шин А. А. // Вестн. Челябин. гос. ун-та. – 2019. – № 3 (425). – С. 230-234. – URL: https://cutt.ly/8_ow5D56 (дата звернення: 01.10.2022)
76. Ложковский А.Г. Теория массового обслуживания в телекоммуникациях: учебник / А.Г. Ложковский. – Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2012. – 112 с.: ил.
77. Козлов А. В. Интернет вещей как субсидиарная система [Электронный ресурс] // Economic Consultant. – 2019. – № 1 (25). – С. 10-16. – URL: <https://cutt.ly/QowбуjX> (дата звернення: 01.10.2022)
78. Колесник П. Д. Перспективы интернета вещей как инструмента

- цифровой экономики [Электронный ресурс] // Хроноэкономика. – 2019. – № 1 (14). – С. 53-58. – URL: <https://cutt.ly/syQbFeN> (дата звернення: 01.10.2022)
79. Колчин Е. Ю. Технология интернета вещей как способ управления потребительской лояльностью [Электронный ресурс] / Колчин Е. Ю., Колчина Н. О. // Вопросы управления. – 2019. – № 6. – С. 200-208. – URL: <https://cutt.ly/2yQbHdf> (дата звернення: 01.10.2022)
80. Коноплев Д. Э. Интернет вещей как новый канал коммуникации: перспективы и риски [Электронный ресурс] // Знак: проблемное поле медиаобразования. – 2019. – № 4. – С. 170-178. – URL: <https://cutt.ly/5yQbzeI> (дата звернення: 01.10.2022)
81. Константинов Н. Э. Блокчейн как платформа для разработки IoT [Электронный ресурс] / Константинов Н. Э., Городничев М. Г., Гематудинов Р. А. // Т-Comm - Телекоммуникации и Транспорт. – 2018. – Т. 12, № 9. – С. 63-68. – URL: <https://cutt.ly/3oeRe29> (дата звернення: 01.10.2022)
82. Коцюбівська К. Упровадження технологій інтернету речей під час створення системи «Розумний дім» [Електронний ресурс] / Коцюбівська К., Прісич В., Яворський О. // Цифрова платформа. Інформаційні технології в соціокультурній сфері. – 2019. – Т. 2, № 2. – С. 136-143. – URL: <http://infotech-soccult.knukim.edu.ua/article/view/187725/187711> (дата звернення: 01.10.2022)
83. Кравченко І. А. Державні заходи впровадження технологій Інтернет речей в соціальній сфері // Інтернет речей: проблеми правового регулювання та впровадження : матеріали II наук.-практ. конф., 29 листоп. 2018 р., м. Київ / Ком. ВР України з питань інформатизації та зв'язку [та ін.] ; [упоряд.: В. М. Фурашев, С. О. Дорогих]. – К., 2018. – С. 117-119. – Відомості доступні також в інтернеті: <https://cutt.ly/eumkv4n> (дата звернення: 01.10.2022)
84. Крайнюченко О. Ф. Можливості та передумови використання інтернету речей на українських підприємствах [Електронний ресурс] / О. Ф. Крайнюченко, Ю. Ю. Єфісько // Наук. вісн. Міжнар. гуманітар. ун-ту. Серія: Економіка і менеджмент. – 2019. – Вип. 35. – С. 160-164. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvmgu_eim_2019_35_23 (дата звернення: 01.10.2022)
85. Криштаносов В. Б. Цифровая экономика: современные направления, динамика развития, вызовы [Электронный ресурс] : [в т. ч. Интернет вещей] // Тр. БГТУ. Серия 5: Экономика и управление. – 2020. – № 1 (232). – С. 13-30. – URL: <https://cutt.ly/7igfbYP> (дата звернення: 01.10.2022)
86. Лаврів О. А., Бешлей М. І., Гнатчук М. М., Поліщук А. В. Модель системи управління ресурсами мультисервісних мереж в умовах самоподібності трафіку // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації”, №. 738, с. 165–172, 2012.

87. Лапін А. В. Інтернет речей як фактор підвищення ефективності фермерських господарств [Електронний ресурс] / А. В. Лапін, І. О. Грінчук // Кооперативні читання : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., 7 черв. 2019 р. – Житомир, 2019. – С. 99-104. – URL: <https://cutt.ly/QiggMaе> (дата звернення: 01.10.2022)
88. Лепеш Г. В. Совершенствование форм взаимодействия между предприятиями в контексте цифровой трансформации [Электронный ресурс] : [в т. ч. Интернет вещей] // Техничко-технол. проблемы сервиса. – 2020. – № 2 (52). – С. 3-10. – URL: <https://cutt.ly/8igg7de> (дата звернення: 01.10.2022)
89. Лоднева О. Н. Анализ трафика устройств Интернета вещей [Электронный ресурс] / Лоднева О. Н., Ромасевич Е. П. // Современ. информ. технологии и ИТ-образование. – 2018. – № 1. – С. 149-169. – URL: <https://cutt.ly/cyQbVog> (дата звернення: 01.10.2022)
90. Лопаткин Д. С. Интернет вещей как фактор цифровой трансформации экономики [Электронный ресурс] // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 9. – С. 257-260. – URL: <https://cutt.ly/3igfIP2> (дата звернення: 01.10.2022)
91. Лукашик В. Автентифікація користувачів у системах Інтернету речей [Електронний ресурс] / В. Лукашик, Т. Грінченко // GLOBAL CYBER SECURITY FORUM (14-16 листоп. 2019 р., м. Харків) : [матеріали виступів на форумі]. – 2019. – С. 64-65. – URL: <https://cutt.ly/Bork93H> (дата звернення: 01.10.2022)
92. Магомаева Л. Р. Цифровые инновации в современной экономике: сферы внедрения и эффекты [Электронный ресурс] : [в т. ч. Интернет вещей] // Вестн. Ин-та экономики РАН. – 2020. – № 2. – С. 137-146. – URL: <https://cutt.ly/SigfJHb> (дата звернення: 01.10.2022)
93. Майданюк Н. В. Проблеми та перспективи застосування технологій Інтернету речей для промислових підприємств [Електронний ресурс] // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2019. – Т. 80, вип. 1. – С. 27-33. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/metrolog_2019_80_1_8 (дата звернення: 01.10.2022)
94. Макаренко Ю. В. Аналіз можливостей використання технологій 5G в системах Інтернету речей // Електронна та Акустична Інженерія. – 2019. – Т. 2, № 2. – С. 45-51. – URL: <https://cutt.ly/QrpgXKp> (дата звернення: 01.10.2022)
95. Маняшев Э. Р. Возможности использования чат-роботов в технологиях интернет-вещей [Электронный ресурс] / Маняшев Э. Р., Смирнова Е. В., Сюезв В. В. // Проблемы совр. науки и образования. – 2019. – № 11-1 (144). – С. 21-26. – URL: <https://cutt.ly/6yQbNxq> (дата звернення: 01.10.2022)
96. Маркова О. М. Реализация операционного риска коммерческого банка в цифровой среде [Электронный ресурс] : [в т. ч. Интернет вещей] // Фин. рынки и банки. – 2020. – № 2. – С. 63-68. – URL: <https://cutt.ly/highyNz> (дата звернення: 01.10.2022)

97. Марціленко С. В. Проектування системи моніторингу на небезпечних хімічних підприємствах з використанням технології Інтернету речей [Електронний ресурс] / С. В. Марціленко, В. В. Правило // Проблеми телекомунікацій : зб. матеріалів XII міжнар. наук.-техн. конф. (16-20 квіт. 2018 р., м. Київ). – К., 2018. – URL: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/131844/128075> (дата звернення: 01.10.2022)
98. Медникова О. В. IoT в транспорте: как интернет вещей помогает избежать катастрофы, аварии и загруженность крупных городов [Электронный ресурс] // Вестн. Акад. знаний. – 2019. – № 4 (33). – С. 154-158. – URL: <https://cutt.ly/0ighgiS> (дата звернення: 01.10.2022)
99. Мельник І. В. Вплив Інтернет речей на цифрову культуру в Україні // Інтернет речей: проблеми правового регулювання та впровадження : матеріали II наук.-практ. конф., 29 листоп. 2018 р., м. Київ / Ком. ВР України з питань інформатизації та зв'язку [та ін.] ; упоряд.: В. М. Фурашев, С. О. Дорогих. – К., 2018. – С. 15-19. – Відомості доступні також в інтернеті: <https://cutt.ly/eumkv4n> (дата звернення: 01.10.2022)
100. Мельниченко А. А. Майбутнє освіти в епоху штучного інтелекту та інтернету речей // Інтернет речей: проблеми правового регулювання та впровадження : матеріали III наук.-практ. конф., 21 листоп. 2019 р., м. Київ / [упоряд.: В. М. Фурашев, С. О. Дорогих, С. Ю. Петраєв]. – К., 2019. – С. 14-15. – Відомості доступні також в інтернеті: <https://cutt.ly/ippA5qb> (дата звернення: 01.10.2022)
101. Міхненко Я. О. Порівняння видів хмарних сервісів в IoT [Електронний ресурс] / Я. О. Міхненко, В. В. Курдеча // Перспективи телекомунікацій : матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф. (15-19 квіт. 2019 р., м. Київ). – К., 2019. – URL: <https://cutt.ly/gpqg4id> (дата звернення: 01.10.2022)
102. Мнушка О. В. SCADA на основі промислового інтернету речей: архітектура системи [Електронний ресурс] // Техн. сервіс агропром., лісов. та транспорт. комплексів. – 2018. – № 12. – С. 117-124. – URL: <https://cutt.ly/QppX9s9> (дата звернення: 01.10.2022)
103. Мнушка О. В. Прикладний протокол обміну даними в Інтернеті речей [Електронний ресурс] / О. В. Мнушка, О. А. Півнева, В. М. Савченко // Вісн. Харків. нац. автомобільно-дорож. ун-ту. – 2019. – Вип. 87. – С. 54-58. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vhad_2019_87_10 (дата звернення: 01.10.2022)
104. Муляр І. В. Модель оцінки ймовірно-часових характеристик інформаційної взаємодії в мережі інтернет речей [Електронний ресурс] / І. В. Муляр [та ін.] // Зб. наук. пр. Військ. ін-ту Київ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. – 2019. – № 63. – С. 96-107. – URL: <https://cutt.ly/XppCtdn> (дата звернення: 01.10.2022)
105. Нашинець-Наумова А. Інтернет речей: реалії сьогодення // Інтернет речей: проблеми правового регулювання та впровадження : матеріали III наук.-практ. конф., 21 листоп. 2019 р., м. Київ / [упоряд.: В. М. Фурашев, С. О. Дорогих, С. Ю. Петраєв]. – К., 2019. – С. 32-35. –

- Відомості доступні також в інтернеті: <https://cutt.ly/joeqPAs> (дата звернення: 01.10.2022)
106. Нгуен Данг Минь Влияние обучающих выборок на процесс обучения адаптивных нейро-нечетких сетей для решения задачи классификаций деталей [Электронный ресурс] - Електрон. дані. - Режим доступу: <http://research-journal.org/technical/vliyanie-obuchayushhix-vyborok-na-process-obucheniya-adaptivnyx-nejro-nchetkix-setej-dlya-resheniya-zadachi-klassifikacij-detalej> (дата звернення: 10.06.2016).
 107. Негоденко О. В. Моделі відновлення сигналів в технології Інтернет речей на основі сплайн-фільтрів // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2018. – № 4 (61). – С. 32-39
 108. Новое поколение Интернета вещей – стандарты и спецификации онтологий etsi [Электронный ресурс] // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – № 9. – С. 73-81. – URL: <https://cutt.ly/cyQb1k8> (дата звернення: 01.10.2022)
 109. Норалиев Н. Х. Цифровые технологии в сельском хозяйстве [Электронный ресурс] : [в т. ч. Интернет вещей] / Норалиев Н. Х., Юсупова Ф. Э. // Вопросы науки и образования. – 2020. – № 8 (92). – С. 4-10. – URL: <https://cutt.ly/loekJne> (дата звернення: 01.10.2022)
 110. Обеспечение сбалансированности развития сетей и платформ Интернета вещей на основе измерения синергетической эффективности [Электронный ресурс] / Кузовкова Т. А. [и др.] // Экономика и качество систем связи. – 2020. – № 1 (15). – С. 13-22. – URL: <https://cutt.ly/figxW14> (дата звернення: 01.10.2022)
 111. Одарченко Р.С., Терентьева І.Є., Гнап Р.В., Михайленко К.О. Дослідження перспективних технологічних рішень для стільникових мереж сімейства стандартів 5G // Перспективи телекомунікацій : матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф. (15-19 квіт. 2019 р., м. Київ). – К., 2019. – URL: <https://cutt.ly/CorkPqE> (дата звернення: 01.10.2022)
 112. Ожеван М. А. Перспективи взаємодії Інтернету речей та Інтернету людей: виклики відчуження та дегуманізації // Інтернет речей: проблеми правового регулювання та впровадження : матеріали II наук.-практ. конф., 29 листоп. 2018 р., м. Київ / Ком. ВР України з питань інформатизації та зв'язку [та ін.] ; упоряд.: В. М. Фурашев, С. О. Дорогих. – К., 2018. – С. 12-15. – Відомості доступні також в інтернеті: <https://cutt.ly/eumkv4n> (дата звернення: 01.10.2022)
 113. Осипчук С. О. Прикладні аспекти реалізації рішень передавання інформації в технологіях Інтернету речей [Електронний ресурс] / С. О. Осипчук, А. В. Мошинська, В. В. Кирашук // Перспективи телекомунікацій : матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф. (15-19 квіт. 2019 р., м. Київ). – К., 2019. – URL: <https://cutt.ly/CorkPqE> (дата звернення: 01.10.2022)
 114. Осовский А. В. Анализ моделей трафика, создаваемого устройствами интернета вещей [Электронный ресурс] / Осовский А. В., Кутузов Д. В., Стукач О. В. // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. – № 4. –

- С. 220-226. – URL: <https://cutt.ly/migxGZ8> (дата звернення: 01.10.2022)
115. Павлишин М. Розподілена інтелектуальна система агромоніторингу з використанням інтернет речей [Електронний ресурс] / М. Павлишин, М. Павлишин, І. Гусар // Техніко-технол. аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сіл. госп-ва України. – 2019. – Вип. 24. – С. 214-219. – URL: <https://cutt.ly/hppSdH1> (дата звернення: 01.10.2022)
 116. Парамонов В. Інтернет речей. [Електронний ресурс] /Парамонов В.// «Розумна» електроніка. URL: <https://www.turkaramamotoru.com/uk/Інтернетречей-20010.html> (дата звернення: 01.10.2022)
 117. Петренко А. І. Криптологія в Інтернеті речей [Електронний ресурс] // Моделювання та інформ. системи в економіці. – 2019. – № 97. – С. 155-163. – URL: <https://cutt.ly/IorknVi> (дата звернення: 01.10.2022)
 118. Петрівський О. Вплив технологій «Інтернету Речей» на особистість людини [Електронний ресурс] // Дослідження проблем гуманітарних наук : зб. наук. пр. / Київ. нац. ун-т технологій та дизайну ; [ред.: А. В. Сакун, Т. І. Кадлубович, Д. С. Черняк]. – К., 2019. – С. 94-99. – URL: <https://cutt.ly/eorzgYP> (дата звернення: 01.10.2022)
 119. Пілінський В. В. Аналіз електромагнітної обстановки пристроїв Інтернету речей у приміщенні [Електронний ресурс] / В. В. Пілінський, О. С. Ратушний, Д. В. Тітков // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2019. – № 27. – С. 50-54. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpitevn_2019_27_10 (дата звернення: 01.10.2022)
 120. Платформа. Як зробити мегаполіс комфортним для життя: Сінгапур. [Електронний ресурс] / «Платформа» // Як зробити мегаполіс комфортним для життя: Сінгапур URL: <https://platfor.ma/magazine/text-sq/pb/comfortablesingapore> (дата звернення: 01.10.2022)
 121. Поддубна М. О. Зв'язок технології «блокчейн» та Інтернету речей [Електронний ресурс] / М. О. Поддубна, Д. А. Міночкін // Перспективи телекомунікацій : матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф. (15-19 квіт. 2019 р., м. Київ). – К., 2019. – URL: <https://cutt.ly/corkf4I> (дата звернення: 01.10.2022)
 122. Попеляєв Д. П. Fog computing як проміжний обчислювальний шар між IoT та Cloud [Електронний ресурс] // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, вир-во. – 2018. – № 33. – С. 31-36. – URL: <https://cutt.ly/8orkrdQ> (дата звернення: 01.10.2022)
 123. Пороло Є. О. Удосконалена архітектура мережі для хмарного Інтернету речей [Електронний ресурс] / Пороло Є. О., Курдеча В. В. // Перспективи телекомунікацій : зб. матеріалів XIV міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 13-17 квіт. 2020 р.) / Ін-т телекомунікац. систем та НДІ телекомунікацій КПІ ім. Ігоря Сікорського. – К., 2020. – URL: <https://cutt.ly/wrqjh4U> (дата звернення: 01.10.2022)
 124. Портал Європейської Комісії. Закони про Інтернет речей [Електронний

- ресурс] /ПЄК//Закони про Інтернет речей. URL: <https://ec.europa.eu/digital-singlemarket/en/policies/internet-things> (дата звернення: 01.10.2022)
125. Праворська Н. І. Проектування системи обміну даними датчика інтернету речей [Електронний ресурс] / Н. І. Праворська, Н. В. Грипинська // Вісн. Хмельн. нац. ун-ту. Техн. науки. – 2018. – № 6 (2). – С. 193-197. – URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2018_6\(2\)__37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2018_6(2)__37) (дата звернення: 01.10.2022)
126. Применение интернета вещей в цепях поставок фармацевтической индустрии [Электронный ресурс] / Баркова Н. Ю. [и др.] // Вестн. ун-та. – 2019. – № 9. – С. 68-74. – URL: <https://cutt.ly/ayQbKex> (дата звернення: 01.10.2022)
127. Прогноз Cisco [электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.html#_Toc953326 (дата звернення: 23.11.2022)
128. Про затвердження Положення про Державний реєстр баз персональних даних та порядок його ведення: Постанова Кабінету Міністрів України від 25 трав. 2011 р. № 616. URL: <http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=616-2011-%EF> (дата звернення: 01.10.2022)
129. Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах Закон України від 05.07.1994 № 80/94-ВР. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua> (дата звернення: 01.10.2022)
130. Про захист персональних даних Верховна Рада України; Закон України від 1 червня 2010 року № 2297-VI. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2297-17/print1476025938545625> (дата звернення: 01.10.2022)
131. Про захист персональних даних: Закон України. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2297-17>. (дата звернення: 23.11.2018)
132. Про інформацію Закон України від 02.10.1992 № 2657-XII. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/>. 36 (дата звернення: 01.10.2022)
133. Про Національну програму інформатизації Закон України. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/74/98-%D0%B2%D1%80/ed19980204> (дата звернення: 01.10.2022)
134. Про основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007 – 2015 рр.: Закон України від 09 січня 2007. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/537-16>. (дата звернення: 23.12.2018)
135. Про першочергові завдання щодо впровадження новітніх інформаційних технологій: Указ Президента. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1497/2005> (дата звернення: 01.10.2022)
136. Про схвалення Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018—2020 роки та затвердження плану заходів щодо її реалізації URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/pro-shvalennya->

- konceptsiyi-rozvitkucifrovoyi-ekonomiki-ta-suspilstva-ukrayini-na-20182020-roki-ta-zatverdzhennyaplanu-zahodiv-shodo-yiyi-realizaciyi (дата звернення: 01.10.2022)
137. Про телекомунікації Верховна Рада України; Закон від 18.11.2003 № 1280-IV // База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1280-15> (дата звернення: 01.10.2022)
 138. Рентюк В. Беспроводные технологии Интернета вещей. Часть 1. Общие сведения и протоколы ближнего радиуса действия // Радио Компоненты. – 2018. – №1/2. – С. 35-39
 139. Рекомендация Y.2069 Термины и определения для интернета вещей. — Женева: Сектор стандартизации электросвязи МСЭ, 2015 г.
 140. Рекомендация Y.2080 Функциональная архитектура организации сетей распределенных услуг. — Женева: Сектор стандартизации электросвязи МСЭ, 2012 г.
 141. Розробка модифікованої архітектури мережі Інтернету речей із використанням LP-WAN / А. І. Вергун [та ін.] // Зв'язок. – 2019. – № 4. – С. 15-17
 142. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / А.П. Ротштейн. – Винница: УНИВЕРСУМ – Винница, 1999. – 320 с.
 143. Романов В. О. Вимоги до сенсорних вузлів у системах Інтернету речей [Електронний ресурс] // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2018. – № 17. – С. 5-9. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kzms_2018_17_3 (дата звернення: 01.10.2022)
 144. Романова М. Н. Системы на основании концепции «Интернет вещей»: тестирование, совместимость, безопасность [Электронный ресурс] / Романова М. Н., Набиев Р. Р. // Вопросы науки и образования. – 2020. – № 14 (98). – С. 4-9. – URL: <https://cutt.ly/Yigx8IP> (дата звернення: 01.10.2022)
 145. Рубашенков А. М. Интернет вещей [Электронный ресурс] / Рубашенков А. М., Бобров А. В. // Достижения науки и образования. – 2018. – № 7. – С. 39-44. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/internet-veschey-2> (дата звернення: 01.10.2022)
 146. Рек. МСЭ-Т Е.800 (09/2008) і Рекомендация МСЭ-Т Е.800. Определение терминов, относящихся к качеству обслуживания [Электронный ресурс]– URL: <https://www.itu.int/rec> (дата звернення: 10.11.2021)
 147. Сахаров В. І. Застосування інтернету речей для контролю температури та вологості повітря [Електронний ресурс] / В. І. Сахаров, С. В. Сахарова // Холод. техніка та технологія. – 2018. – Т. 54, вип. 1. – С. 51-55. – URL: <https://cutt.ly/AppSQNF> (дата звернення: 01.10.2022)
 148. Стрелковська І. В. Прогнозування мультимедійного трафіку пристроїв Інтернет речей IoT/5G / І. В. Стрелковська, І. М. Соловська // Європейський вибір України, розвиток науки та національна безпека в реаліях масштабної військової агресії та глобальних викликів ХХІ століття» (до 25-річчя Національного університету «Одеська юридична

- академія» та 175-річчя Одеської школи права) : у 2 т. : матеріали Міжнар.наук.-практ. конф. (м. Одеса, 17 червня 2022 р.) / за загальною редакцією С. В. Ківалова. – Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2022. – Т. 1. – С. 731-736.. – URL: <http://dspace.onua.edu.ua/> (дата звернення: 01.02.2023)
149. Н. Ахмед, С. Канхири, С. Дха «Характеристики канала для летающих платформ, обслуживающих сенсорные сети» // IEEE Communications Magazine. 2016. Volume: 54, Issue: 5. P. 52-57.
150. Сердюков Р. Д. Сущность и структурные компоненты цифровой экосистемы промышленного предприятия [Электронный ресурс] : [пром. Интернет-вещей] // Естеств.-гуманитар. исследования. – 2020. – № 3 (29). – С. 300-305. – URL: <https://cutt.ly/UigcxLC> (дата звернення: 01.10.2022)
151. Сидоренко С. «Интернет речей» як об'єкт соціальн(дата звернення: 01.10.2022)о-філософського аналізу // Концептуальні та практичні засади становлення і розвитку «smart-освіти» як чинника формування «smart-культури» в умовах еволюції від інформаційного суспільства до «smart-суспільства» : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 19-20 груд. 2018 р. / МОН України, ЗДІА ; [авт.: М. Ажажа та ін.]. – Запоріжжя, 2018. – С. 112-115
152. Скіцько В. І. Інтернет речей у логістиці: сьогодення та тенденції // Цифрова економіка: зб. матеріалів Нац. наук.-метод. конф., 4–5 жовт. 2018 р., м. Київ / МОН України, ДВНЗ «Київ. нац. екон. ун-т ім. В. Гетьмана» [та ін.] ; [оргком.: Д.Г. Лук'яненко (голова) та ін.]. – К., 2018. – С. 330–334. – Відомості доступні також в інтернеті: <https://cutt.ly/morlP0u> (дата звернення: 01.10.2022)
153. Смолин О. І. Інтернет речей як технологічний феномен ХХІ століття [Електронний ресурс] / Смолин О. І., Олексюк В. П. // Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання: досвід, тенденції, перспективи : матеріали IV міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Тернопіль, 30 квіт. 2020 р.). – Тернопіль, 2020. – С. 147-149. – URL: <https://cutt.ly/VoerZpj> (дата звернення: 01.10.2022)
154. Соколов В. О. Порівняльний аналіз пропускну здатності малопотужних безпроводових IoT-комутаторів [Електронний ресурс] / В. О. Соколов, Б. В. Вовкотруб, Є. О. Зоткін // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. – 2019. – № 1. – С. 16-30. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cest_2019_1_4 (дата звернення: 01.10.2022)
155. Соломенникова Е. А. Цифровизация машиностроительных и станкостроительных производств – основа повышения конкурентоспособности высокотехнологического бизнеса [Электронный ресурс] : [в т. ч. Интернет вещей] // Большая Евразия: развитие, безопасность, сотрудничество. – 2020. – № 3-1. – С. 551-554. – URL: <https://cutt.ly/bighnxxg> (дата звернення: 01.10.2022)
156. Сорокін Д. В. Інфраструктура промислових мереж IoT та кіберзагрози в доступі при використанні IoT рішень / Д. В. Сорокін, А. П. Бондарчук,

- К.П. Сторчак // Телекомунікаційні та інформ. технології. – 2019. – № 4. – С. 120-127.* – Відомості доступні також в інтернеті: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt_2019_4_14 (дата звернення: 01.10.2022)
157. Lozhkovskiy A.G. Novi metody teoriiy teletrafika / A.G. Lozhkovskiy. – Odesa: ONAZ im. O.S. Popova, 2018. – 80 s.
158. Спутниковая низкоорбитальная вычислительная сеть Интернета вещей [Электронный ресурс] // Перспективи телекомунікацій : матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф. (15-19 квіт. 2019 р., м. Київ). – К., 2019. – URL: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/166357/165756> (дата звернення: 01.10.2022)
159. Срібна І. М. Веб-сервіси AWS для розгортання пристроїв IoT / І. М. Срібна, Є. В. Савчук // Зв'язок. – 2019. – № 4. – С. 18-23
160. Стефанова Н. А. Интернет вещей как основа цифровой экономики [Электронный ресурс] // Стефанова Н. А., Трухина А. Д. // Эксперт: теория и практика. – 2019. – № 3. – С. 60-65. – URL: <https://cutt.ly/Ноер5хg> (дата звернення: 01.10.2022)
161. Суворова С. Д. Проектирование цифровых логистических платформ в цепи поставок [Электронный ресурс]: [в т. ч. с использованием Интернета вещей] / С. Д. Суворова, И. А. Бойко, А. И. Захаренко // Естеств.-гуманитар. исследования. – 2020. – № 3 (29). – С. 321-325. – URL: <https://cutt.ly/aighS1y> (дата звернення: 01.10.2022)
162. Телеком індустрія України в 2021 році. Ключові тенденції, досягнення та пріоритети – погляд НКЕК / Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку. – URL: <https://nkrzi.gov.ua/index.php?r=site/index&pg=99&id=2311&language=uk> (дата звернення 06.08.2022)
163. Стільниковий зв'язок. Принцип роботи. – URL: <https://hi-news.pp.ua/tehnka-tehnologyi> (дата звернення: 10.12.2021)
164. Тимофєєва Л. Ю. «Інтернет речей»: виклики в умовах євроінтеграції // Інтернет речей: проблеми правового регулювання та впровадження : матеріали II наук.-практ. конф., 29 листоп. 2018 р., м. Київ / Ком. ВР України з питань інформатизації та зв'язку [та ін.] ; упоряд.: [В. М. Фурашев, С.О. Дорогих]. – К., 2018. – С. 134-137. – Відомості доступні також в інтернеті: <https://cutt.ly/eumkv4n> (дата звернення 06.08.2022)
165. Ткачук Н. А. Використання Інтернету речей в розвідувальній діяльності // Інтернет речей: проблеми правового регулювання та впровадження : матеріали II наук.-практ. конф., 29 листоп. 2018 р., м. Київ / Ком. ВР України з питань інформатизації та зв'язку [та ін.] ; упоряд.: В. М. Фурашев, С. О. Дорогих. – К., 2018. – С. 110-113. – Відомості доступні також в інтернеті: <https://cutt.ly/eumkv4n> (дата звернення 06.08.2022)
166. Ткачук Т. Інтернет-речі: від фантастики минулого до реалій сьогодення // Інтернет речей: проблеми правового регулювання та впровадження : матеріали III наук.-практ. конф., 21 листоп. 2019 р., м. Київ / [упоряд.: В. М. Фурашев, С. О. Дорогих, С. Ю. Петряєв]. – К., 2019. – С. 16-19. –

- Відомості доступні також в інтернеті: <https://cutt.ly/Morl2Hv> (дата звернення 06.08.2022)
167. Токарева М. С. Влияние технологий Интернета вещей на экономику [Электронный ресурс] / Токарева М. С., Вишневы К. О., Чихун Л. П. // Бизнес-информатика. – 2018. – № 3 (45). – С. 62-80. – URL: <https://cutt.ly/0ighVty> (дата звернення 06.08.2022)
 168. Хлапонін Ю.І. Применение методов регрессионного анализа для мониторинга и управления телекоммуникационными системами / Хлапонін Ю.І., Абдураманов Р. А. // Information Technology and Security, Vol. 5, Iss. 2, pp. 1-7, July-December 2017
 169. Хлапонін Ю.І. Современные проблемы создания сложных информационно-управляющих систем реального времени / Хлапонін Ю.І., Недайдіда Ю.П., Котова Ю.В.// Захист інформації. – 2012. – № 4 (57). – С. 50-55.
 170. Хлапонін Ю.І. Застосування нейронних мереж в статистичній системі аналізу і моніторингу телекомунікаційних мереж / Хлапонін Ю.І., Жиров Г. Б., Нікітчин О. М. – К.: Технологический аудит и резервы производства, 2016. – С.35.
 171. Хлапонін Ю.І. Побудова апроксимаційної функції на основі алгоритму зворотного розповсюдження помилки як методу навчання штучних нейронних мереж / І.І. Бех, С.О. Новак, Ю.І. Хлапонін // Вісник інженерної академії. – 2016. – № 1. – С. 198–201.
 172. Шрамко С. Використання інтернету речей (IoT) у забезпеченні громадської безпеки: постановка проблеми // Інтернет речей: проблеми правового регулювання та впровадження : матеріали III наук.-практ. конф., 21 листоп. 2019 р., м. Київ / [упоряд.: В. М. Фурашев, С. О. Дорогих, С. Ю. Петряєв]. – К., 2019. – С.106-108. – URL: <https://cutt.ly/ХоехqU6> (дата звернення 06.08.2022)
 173. Юдін О.М. Контроль захищеності бездротових комп'ютерних мереж/ О.М. Юдін, Ю.І. Хлапонін Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2015, №2(19). – С. 92 – 96.
 174. Akyildiz, Ian F., Shuai Nie, Shih-Chun Lin and Manoj Chandrasekaran. "5G roadmap: 10 key enabling technologies." ELSERVIER, vol. 106, 2016, pp. 17-48
 175. Amy Nordrum, Kristen Clark and IEEE Spectrum Staff. Everything You Need to Know About 5G. IEEE Spectrum. Архів оригіналу за 20.01.2019. Процитовано 26.01.2022
 176. AN INTRODUCTION TO LTE. LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS. // Christopher Cox. - UK.: John Wiley & Sons Ltd, 2012. – P. 486.
 177. Best, Jo. The race to 5G: Inside the fight for the future of mobile as we know it. TechRepublic. Архів оригіналу за 05.02.2017. Процитовано 14.01.2022
 178. Data-Smart City Solutions URL:<https://datasmart.ash.harvard.edu/>. (дата звернення: 23.12.2021)
 179. Definition Internet-of-Things-IoT. URL:

- <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-ИoT> (дата звернення: 23.12.2021)
180. Chornaya, D. Investigation of Machine-To-Machine Traffic Generated by Mobile Terminals / D. Chornaya, A. Paramonov, A. Koucheryavy // В сборнике: International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops 6. Сер. "2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2014", 2015. — С. 210–213.
 181. RFID метка: классификация, принципы работы и особенности применения [Электронный ресурс] – URL: <https://scanport.ru/blog/rfid-metka-klassifikacziya-princzipy-raboty-i-osobennosti-primeneniya> (дата звернення: 23.12.2021)
 182. FCC vote will pave the path for 5G advancements to mobilize mmWave [UPDATED], Qualcomm, 24-Jul-2018. URL: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2016/07/12/upcoming-fccvote-will-pave-path-5g-advancements-mobilize-mmwave>. (дата звернення: 23.12.2021)
 183. Greenfield A. (2013). Against the Smart City. URL:http://www.academia.edu/6732875/Emerging_Markets_and_Digital_Economy_Building_Trust_in_the_Virtual_World_032. (дата звернення: 23.11.2021)
 184. Hashim, N., Mohsim, A.H., Rafeeq, R.M., Pyliavskiy, V. New approach to the construction of multimedia test signals. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. 2019. 8(6), p. 3423-3429
 185. Howling Pixel. Интернет речей [Электронный ресурс] / Howling Pixel // Интернет речей URL: https://howlingpixel.com/i-uk/Интернет_речей 33 (дата звернення 06.08.2022)
 186. IoT maturity in the new digital world URL: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/blog/IoT-Agenda/Get-smart-aboutdata-integration-for-a-truly-smart-city> (дата звернення 06.08.2022)
 187. ITU towards “IMT for 2020 and beyond” - IMT-2020 standards for 5G. International Telecommunications. Архів оригіналу за 29 серпня 2015. Процитовано 22.02.2022
 188. Khlaponin Yuriy, Qasim Nameer, Dmytro Khlaponin, Igor Trush, Mikołaj Karpiński, Uliana Iatsykovska. Operation analysis of statistical information telecommunication networks using neural network technology. IEEE IDAACS-SWS 2018 (4th IEEE International Symposium on Wireless Systems within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems) Lviv Polytechnic National University Lviv, Ukraine, September 20-21, 2018, С.199-203
 189. Palattella, M. R., Dohler, M., Grieco, A., Rizzo, G., Torsner, J., & Engel, T. (2016, March). Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models. IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, 34(3)
 190. Networking, C.V. (2016) Cisco Global Cloud Index: Forecast and

- Methodology 2015-2020 (White Paper). Cisco Public, San Jose.
191. Nameer Hashim Qasim, Alaan Ghazi, S.A. Aljunid, Syed Zulkarnain Syed Idrus, C.B.M Rashidi, Aras Al-dawoodi, Baban A. Mahmood, Alaa Fareed, Mohammed U. Zaenal, Ranjdr M. Rafeeq. A Systematic review of Multi-Mode Fiber based on Dimensional Code in Optical-CDMA. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1860/1/012016/pdf> (дата звернення 06.08.2022)
 192. Nameer Hashim, Aram H. Mohsim, Ranjdr M. Rafeeq and Volodymyr Pyliavskiy Color correction in image transmission with multimedia path ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 15 No. 10. p. 34- http://www.arnjournals.com/jeas/volume_10_2020.h (дата звернення 06.08.2022)
 193. Recommendation Y.2066 Common requirements of the Internet of things. — Geneva: Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2014. 6815890. Архів оригіналу за 3 липня 2018. Процитовано 01.03.2021
 194. Recommendation Y.2078 Application support models of the Internet of things. — Geneva: Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2015.
 195. Stasiak, M. Modeling and Dimensioning of mobile networks from GSM to LTE / Maciej Stasiak, Mariusz Głabowski, Arkadiusz Wisniewski, Piotr Zwierzykowski. - John Wiley & Sons Ltd. – 2011. – P. 136.
 196. Qasim N.H., Pyliavskiy, V.V. Color temperature line: Forward and inverse transformation. Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. 2020. 23(1), p. 75-80
 197. Qasim Nameer, Volodymyr Pyliavskiy and Valentina Solodka. “Development of test materials for assessment broadcasting video path.” arXiv: Image and Video Processing (2019):1907.11406 (Cornell University). 16 P. <https://arxiv.org/abs/1907.11406> (дата звернення 06.08.2022)
 198. Qasim, N.H., Shevchenko, Yu.P., Pyliavskiy, V.V. Analysis of methods to improve energy efficiency of digital broadcasting. Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika). 2019. 78(16). p. 1457-1469
 199. Yurii Khlaponin, Nameer Hashim Qasim, Volodymyr Vyshniakov, Vadym Poltorak. Concept of Data Protection Technologies Development in E-voting Systems. International IRJMETS. Volume:03/Issue:09/September-2021
 200. Yurii Khlaponin, Olha Izmailova, Nameer Hashim Qasim, Hanna Krasovska, Kateryna Krasovska. Management risks of dependence on key employees: identification of personnel. Workshop on "Cybersecurity Providing in Information and telecommunication Systems" (CPITS 2021) <http://sec.picst.org/> January 28, 2021 pp 295-308 <http://ceur-ws.org/Vol-2923/paper33.pdf> (дата звернення 06.08.2022)
 201. Y.2060 Обзор интернета вещей. Международный союз электросвязи, сектор стандартизации, 06/2012.
 202. FCC vote will pave the path for 5G advancements to mobilize mmWave [UPDATED], Qualcomm, 24-Jul-2018. URL:

- <https://www.qualcomm.com/news/onq/2016/07/12/upcoming-fccvote-will-pave-path-5g-advancements-mobilize-mmwave> (дата звернення 06.08.2022)
203. 3GPP TS 23.203 Standardized QCI characteristics [UPDATED], - URL: https://www.researchgate.net/figure/3GPP-TS-23203-Standardized-QCI-characteristics-7_tbl1_308595678 (дата звернення 06.08.2022)
 204. D. Panno and S. Riolo, "A New Joint Scheduling Scheme for GBR and non GBR Services in 5G RAN," 2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), Barcelona, Spain, 2018, pp. 1-6.
 205. F. Kuo, K. Ting, C. Tseng, H. Wang and Ming-Wei Chen, "Scheduling both GBR and non-GBR uplink bearers based on moving average of data rate," 2015 11th International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness (QSHINE), Taipei, Taiwan, 2015, pp. 11-16.
 206. M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko and T. Maksymyuk, "Improving architecture of LTE mobile network for IoT services provisioning," 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), 2017, pp. 209 – 212.
 207. Y. Xu et al., "Enhancements on Coding and Modulation Schemes for LTE Based 5G Terrestrial Broadcast System," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 66, no. 2, pp. 481-489, June 2020.
 208. R. Pagliari, Y. . -W. P. Hong and A. Scaglione, "Bio-inspired algorithms for decentralized round-robin and proportional fair scheduling," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 28, no. 4, pp. 564-575, May 2010.
 209. P. Andres-Maldonado, P. Ameigeiras, J. Prados-Garzon, J. J. Ramos-Munoz and J. M. Lopez-Soler, "Reduced M2M signaling communications in 3GPP LTE and future 5G cellular networks," 2016 Wireless Days (WD), 2016, pp. 1-3.
 210. Khlaponin Y., Methods for assessing the impact of bandwidth of control channels on the quality of telecommunications networks in the transmission of data packets of different types / Yurii Khlaponin, Mohialdeen Mustafa Mohammed, Berkman Lyubov, Zaika Viktor, Polonskyi Konstantyn, Turovsky Oleksandr // International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS) ISSN: 2073-607X
 211. Khlaponin Y. IoT-based Pain Monitoring and Management System / Yurii Khlaponin, Fouad Jameel Ibrahim Alazzawia, Marwa Azzawib, Madiha Fouad Jameelc, // The Workshop on Emerging Technology Trends on the Smart Industry and the Internet of Things «TTSIIT», to be held on January

- 19-20th, 2022 (online). The 1st International Conference on Emerging Technology Trends on the Smart Industry and the Internet of Things «TTSIIT» January 19th 2022 CEUR Workshop, Vol-2654 P. 786 – 797. – ISSN 1613-0073 <http://ceur-ws.org/Vol-2654/>
212. Andrews D.F. A Robust Method for Multiple Linear Regression // *Technometrics*. 1974. Vol. 16. P. 523–531.
 213. Hogg R.V. Adaptive Robust Procedures: A Partial Review and Some Suggestions for Future Applications and Theory // *Journal of the American Statistical Association*. 1972. Vol. 43. P. 1041–1067.
 214. Zakhour R. Optimized data sharing in multicell MIMO with finite backhaul capacity / R.Zakhour, D. Gesbert // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2011. –59(12). –P. 6102–6111.
 215. Koenker R., Bassett G., Jr. Regression Quantiles // *Econometrica*. 1978. Vol. 46. No.1. P.33–50.
 216. Koenker R., Hallock K.F. Quantile Regression // *Journal of Economic Perspectives*. 2001. Vol. 15. No.4. P.143–156.
 217. Huber P.J., *Robust Statistics*. 1981. New York: John Wiley and sons.
 218. Karst O.J. Linear Curve Fitting Using Least Deviations // *Journal of the American Statistical Association*. 1958. Vol. 53. No. 281. P. 118–132.
 219. Wagner H.M. Linear Programming Techniques Regression Analysis // *Journal of the American Statistical Association*. 1959. Vol. 54. No. 285. P.206–212.
 220. Kenneth Q. Z., Stephen L. P. Direct Use of Regression Quantiles to Construct Confidence Sets in Linear Models // *The Annals of Statistics*. 1996. Vol. 24. No. 1. P. 287–306.
 221. Zakasovskaya E.V., Fadeev V.V. Restoration of point influences by the fiber-optical network in view of a priori information // *SPIE Proc. APCOM*. — 2007. — Vol. 6675.
 222. *Interference management in wireless networks: Practice and Theory [Text]* / Imperial College London, Eurecom, Bruno Clerckx, 2013.
 223. Simeone O. Downlink multicell processing with limited backhaul capacity / O. Simeone, O. Somekh, H. V. Poor, S. Shamai // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. –2009. – P. 1-10.
 224. Schaaf M. Towards a Timely Root Cause Analysis for Complex Situations in Large Scale Telecommunications Networks / Marc Schaaf, Gwendolin Wilke, Topi Mikkola, Erik Bunn, Ilkka Hela, Holger Wache, Stella Gatzu Grivas // *Procedia Computer Science*. – 2015. – Volume 60. – P. 160–169.
 225. Ohwatari Y. Investigation on improvement in channel estimation accuracy using data signal muting in downlink coordinated multiple-point transmission and reception in LTE-Advanced / Y.Ohwatari, N. Miki, T. Abe, S. Nagata,

- Y. Okumura // Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Quintana-Roo, Mexico. 28-31 March, 2011. – P. 1288–1293.
226. Kulchin Yu.N. Optimizing algebraic and neural methods for information processing in distributed fiber-optical measuring systems / Yu.N. Kulchin, E.V. Zakasovskaya // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2010. – Vol. 19. – N 3. – P. 237–247.
227. Zakhour R. Optimized data sharing in multicell MIMO with finite backhaul capacity / R.Zakhour, D. Gesbert // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2011. –59(12). –P. 6102–6111.

ДОДАТОК А
РІШЕННЯ СИСТЕМИ НЕОДНОРІДНИХ РІВНЯНЬ ДЛЯ МЕРЕЖІ
СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Мережа системи масового обслуговування (СМО) складається з чотирьох окремих систем масового обслуговування $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ без втрат, де S_1 – кластер Кл1, S_2 – транспортна мережа ТМ1, S_3 – транспортна мережа ТМ2, S_4 – кластер Кл2 та має наступний граф станів (рис.А.1):

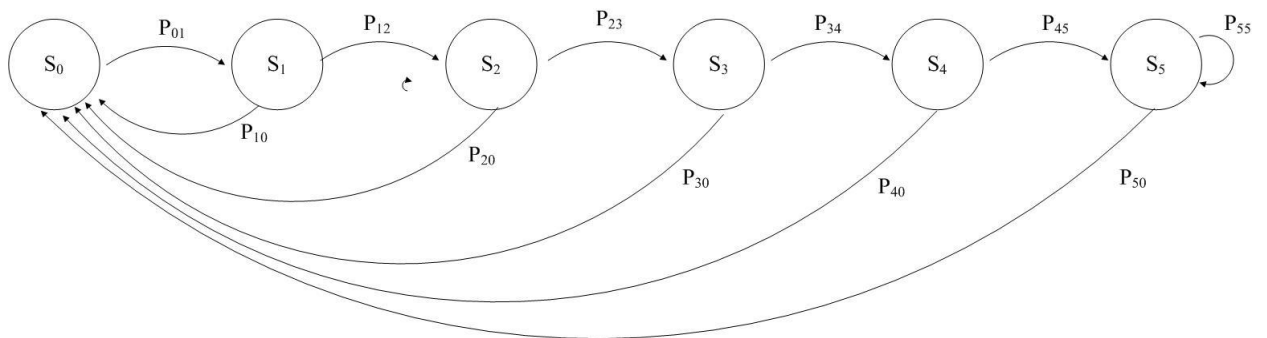


Рисунок А.1. Граф станів мережі системи масового обслуговування

СМО функціонує наступним чином. Запити на обслуговування від IoT зі станом S_0 з імовірністю P_{01} надходять в 1-у СМО, де запит обслуговується в кластері Кл1 зі станом S_1 . В подальшому запит, який пройшов обслуговування на i -й СМО, з імовірністю P_{ij} надходить для обслуговування в j -ту СМО або з імовірністю P_{i0} залишає систему. Запит на обслуговування до кінцевого пристрою IoT зі станом S_5 з імовірністю P_{45} надходить з 4-й СМО, де запит обслуговується у кластері Кл2 зі станом S_4 , потім з імовірністю P_{50} залишає систему або з імовірністю P_{55} остається.

Щоб у мережі СМО виник стаціонарний режим, потрібно, щоб кожна СМО, яка входить до мережі, функціонувала в стаціонарному режимі, що визначається наступною системою неоднорідних рівнянь:

$$\begin{cases} P_{01} \cdot \lambda_1 + 0 \cdot \lambda_2 + 0 \cdot \lambda_3 + 0 \cdot \lambda_4 + 0 \cdot \lambda_5 = 1 \cdot \lambda_0 \\ (-1) \cdot \lambda_1 + P_{12} \cdot \lambda_2 + 0 \cdot \lambda_3 + 0 \cdot \lambda_4 + 0 \cdot \lambda_5 = P_{10} \cdot \lambda_0 \\ 0 \cdot \lambda_1 + (-1) \cdot \lambda_2 + P_{23} \cdot \lambda_3 + 0 \cdot \lambda_4 + 0 \cdot \lambda_5 = P_{20} \cdot \lambda_0 \\ 0 \cdot \lambda_1 + 0 \cdot \lambda_2 + (-1) \cdot \lambda_3 + P_{34} \cdot \lambda_4 + 0 \cdot \lambda_5 = P_{30} \cdot \lambda_0 \\ 0 \cdot \lambda_1 + 0 \cdot \lambda_2 + 0 \cdot \lambda_3 + (-1) \cdot \lambda_4 + P_{45} \cdot \lambda_5 = P_{40} \cdot \lambda_0 \\ 0 \cdot \lambda_1 + 0 \cdot \lambda_2 + 0 \cdot \lambda_3 + 0 \cdot \lambda_4 + (P_{55} - 1) \cdot \lambda_5 = P_{50} \cdot \lambda_0 \end{cases}$$

Рішенням такої системи рівнянь у вигляді матриці-стовпця буде:

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \frac{1}{P_{01}} \cdot \lambda_0 \\ \frac{P_{10}}{P_{12}} \cdot \lambda_0 \\ \frac{(P_{10} + P_{20})}{P_{23}} \cdot \lambda_0 \\ \left(\frac{(P_{45} \cdot P_{50})}{1 - P_{55}} - P_{40} \right) \cdot \lambda_0 \\ \frac{P_{50}}{1 - P_{55}} \cdot \lambda_0 \end{bmatrix}$$

ДОДАТОК Б

ФРАГМЕНТИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БІЛІНГОВОЇ СИСТЕМИ ОПЕРАТОРА ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ОБЛІКУ ВИКОРИСТАННЯ ІОТ

Для системи обліку використання пристроїв ІоТ потрібно вирішити наступні задачі грошового обліку:

- облік транзакцій;
- приймання платежів;
- списання платежів;
- періодичні списання.

Всі приклади у цьому додатку надані на мові програмування Python.

Для ІоТ базовою одиницею, зазвичай, обирається транзакція, що відповідає обслуговуванню оператором зв'язку одного запиту від ІоТ на передачу або приймання даних. Модель обліку транзакції може мати таку модель:

```
class UserBalanceChange(models.Model):
    user = models.ForeignKey('User', related_name='balance_changes')
    # посилання на користувача
    reason = models.IntegerField(choices=REASON_CHOICES, default=NO_REASON)
    # підстава для зміни балансу на рахунку користувача:здійснення оплати/списання
    amount = models.DecimalField(_('Amount'), default=0, max_digits=18,
    decimal_places=6)
    # сума послуги за транзакцію
    datetime = models.DateTimeField(_('date'), default=timezone.now)
    # час здійснення транзакції
```

Транзакція складається з прив'язки до користувача, причин поповнення (або списання), вартість транзакції і часу здійснення цієї операції.

Для приймання платежів необхідно заздалегідь підключитися до відповідної платіжної системи, для чого потрібно виконати наступне:

- зареєструватися у платіжній системі;

отримати ключі АРІ. Ключ АРІ – це унікальний рядок, що складається з 52 випадкових цифр і букв, який слугує засобом захисту фінансової транзакції шляхом порівняння.

Модель отримання платежів за обслуговування ІоТ в платіжній системі PayPal може мати таку модель:

```
from PayPal.signals import result_received
# вибір платіжної системи
def payment_received(sender, **kwargs):
    order = OrderForPayment.objects.get(id=kwargs['InvId'])
    # ідентифікація отриманого платежу
    user = User.objects.get(id=order.user.id)
    # ідентифікація користувача до платежу
    order.success=True
```

```

# прийняти цій платіж від цього користувача
    order.save()
# зберігання даних щодо платіжу
    try:
        sum = float(order.payment)
# виділити суму з платежу
    except Exception, e:
        pass
    else:
        balance_change = UserBalanceChange(user=user, amount=sum,
reason=BALANCE_REASONS.PayPal)
# збільшення балансу користувача на визначену суму
        balance_change.save()
# зберігання змін в балансі користувача

```

При списанні коштів з рахунку користувача необхідно перевіряти наявність цих коштів, якщо не потрібно обслуговувати користувача у кредит. При отриманні запиту на обслуговування спочатку перевіряється наявність необхідної суми на рахунку користувача, а вже потім здійснюються необхідні зміни в балансі цього користувача. Якщо коштів не достатньо, то запит на обслуговування завершується відмовою в обслуговуванні. Модель списання вартості обслуговування IoT може мати таку модель:

```

payment_sum = sum
# необхідна сума на списання коштів з балансу користувача IoT
users = User.objects.filter(id__in=has_clients,
balance__gt=payment_sum).select_related('tariff')
# перевірка достатності коштів на балансі користувача IoT

```

Вище був розглянутий варіант списання коштів у випадку разового списання коштів, наприклад, як абонентне обслуговування. Але частіше оператор зв'язку здійснює списання коштів з рахунку користувача за кожною транзакцією. Модель списання вартості обслуговування IoT за підпискою (періодичні списання) може мати таку модель:

```

def charge_tariff_hour_rate(user):
    now = datetime.now
    # зберігається час останній зміни балансу користувача IoT
    second_rate = user.get_second_rate()
    # поновлюється час зміни балансу користувача IoT
    hour_rate = (now - user.last_hourly_billing).total_seconds() * second_rate
    balance_change_reason = UserBalanceChange.objects.create(
        user=user,
        reason=UserBalanceChange.TARIFF_HOUR_CHARGE,
        amount=-hour_rate,

```

```

)
balance_change_reason.save()
# зберігання причини зміни балансу користувача IoT
user.last_hourly_billing = now
# зберігання змін до тарифного плану
user.save()
# зберігання змін в балансі користувача

```

При списанні та зарахуванні коштів з/на рахунок користувача необхідно кожен раз здійснити звернення до бази даних, що є значним за часом процесом, тому в програмі білінгу є окрема процедура, яка контролює останній запит до змін в балансі користувача і зберігає значення балансу остаточного прямо в моделі користувача:

```

class UserBalanceSubscriptionLast(models.Model):
    user = models.ForeignKey('User', related_name='balance_changes')
    subscription = models.ForeignKey('Subscription', related_name='subscription_changes')
    datetime = models.DateTimeField(_('date'), default=timezone.now)

```

Застосування цієї моделі дозволяє гнучко реалізувати періодичні зміни в балансі користувача.

ДОДАТОК В ДОКУМЕНТИ, ЯКІ ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ОСНОВНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІОННОЇ РОБОТИ

Результати дисертаційної роботи впроваджено у Державному підприємстві «Науковий центр точного машинобудування» Державного космічного агентства України (акт впровадження № 013 від 4.04.2022 р.), ТОВ "Світ-ІТ", (акт впровадження № 1211-19 від 11.10.2022 р.), ТОВ «ТЕХНОПАРК А+», (акт впровадження від 28 лютого 2023р.), у навчальному процесі: - у Київському національному університеті будівництва і архітектури (Довідка про впровадження від 22.12.2022 р. № 17); у Аль-Рафідаїн Університеті (Багдад, Ірак).

Матеріали дисертації використані в НДДКР «Ідентифікація переходу до закритичного режиму роботи робототехнічної системи», державний реєстраційний номер: 0123U103047, дата реєстрації: 29-06-2023 та в НДДКР «Методи і моделі забезпечення безпеки та діагностики критичних параметрів у складних системах з використанням ІоТ», державний реєстраційний номер: 0123U103640, дата реєстрації: 05-09-2023.

Надалі наведено відповідні акти впровадження.



**Державне космічне агентство України
Державне підприємство
«Науковий центр точного машинобудування»**

02099, м. Київ, вул. Бориспільська, 9, а/с 47, т/ф +38 044 566-84-55



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Державного підприємства
«Науковий центр точного машинобудування»
д.т.н., професор

04 квітня 2022 р.

Олександр СЕЛЮКОВ

Акт № 1

**про впровадження результатів дисертаційної роботи
КАСІМА НАМІРА ХАШІМА**

Комісія у складі: голови комісії – заступника директора ДП «НЦТМ» з наукової роботи Якімова В.В та членів комісії: Гречці О.В. та Яценки Н.Г. встановила, що в Державному підприємстві «Науковий центр точного машинобудування» Державного космічного агентства України реалізовані результати наукових досліджень, які розроблені особисто Касімом Наміром Хашімом, а саме подальший розвиток отримали методи керування розподілом ресурсів в мережах стандарту LTE/5G між пристроями Інтернету речей для забезпечення якості обслуговування, який дозволяє на основі зміни пріоритетів пакетів потоку навантаження забезпечити якість обслуговування в мережі Інтернету речей.

Визначено, що запропоновані методи керування розподілом ресурсів в мережах стандарту LTE/5G дозволяє підвищити ефективність використання каналів передачі на 7% та зменшити середню затримку загалом на 16% у порівнянні з динамічним алгоритмом Central Queuing.

Запропонований автором метод інтелектуального керування розподілом ресурсів в мережах стандарту LTE/5G з наданням сервісів Інтернету речей є підставою для теоретичної проробки та обґрунтування вимог до перспективних телекомунікаційних систем та мереж зв'язку.

Голова комісії:

Члени комісії:

4 квітня 2022 р.



В.В. Якімов

О.В. Гречка

Н.Г. Яценко



ТЕХНОПАРК А+

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «ТЕХНОПАРК А+»

д.т.н. проф. Олександр ССЛЮКОВ

30 вересня 2022 року

Акт

впровадження науково-технічних результатів, що отримані в дисертаційній роботі Касіма Наміра Хашіма

Комісія, в складі голови Лисенко Володимира Володимировича та членів Морозько Ірини Павлівни та Ліхунова Євгена Володимировича, проаналізувавши дисертаційну роботу Касіма Наміра Хашіма «Методологія забезпечення якості обслуговування IoT в мережі 5G», яка проводилась на базі Товариства з обмеженою відповідальністю «Технопарк А+» в рамках наступних видів господарської діяльності: 26.11 – виробництво електронних компонентів; 33.12 – ремонт і обслуговування машин і устаткування, по впровадженню результатів його дисертаційних досліджень встановила наступне:

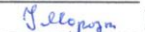
1. На основі виконаного аналізу методологічних підходів до адаптації інформаційних технологій інтернету речей в мобільній мережі зв'язку стандарту 5G показано, що ці питання адаптації не до кінця розроблені та потребують подальшого розвитку.

2. Оцінювання забезпечення якості обслуговування в мережі Інтернету речей можливо за допомогою створеної автором імітаційної моделі, для якої розроблена структура, математичний апарат та показані результати чисельного моделювання.

Для вирішення проблеми розроблення комплексної методики забезпечення якості обслуговування між пристроями Інтернету речей в мережах стандарту LTE/5G в дисертації широко використовуються принципи, методи і засоби системного аналізу, структурного, математичного і імітаційного моделювання, комбінаторики, теорії ймовірностей, елементи штучного інтелекту.


Результати дисертації рекомендуємо для застосування в учбовому процесі при вивченні високоефективних систем Інтернету речей в мережах стандарту LTE/5G.


Голова комісії:  Лисенко В. В.


Члени комісії:  Морозько І. П.

 Ліхунов Є. В.

30 вересня 2022 року

 Товариство з обмеженою відповідальністю «ТЕХНОПАРК А+»

 а/с 92 Київ
02099
Україна

 +38 (044) 369 54 51
selukov@3g.ua
www.usc.kiev.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор ТОВ "СВІТ ІТ"

 І.Г. КОВАЛЬОВ
 « 07 » грудня 2022 р.

Акт № 0712-22
про впровадження результатів дисертаційної роботи
КАСІМА Наміра Хашіма Касіма




Комісія у складі: голови комісії – заступника комерційного директора ТОВ "СВІТ ІТ" Балаба О.В. та членів комісії: Литвина М.П., Бакалова Л.Д., встановила, що в ТОВ "СВІТ ІТ" реалізовані результати наукових досліджень, які розроблені особисто КАСІМОМ Наміром Хашімом Касімом, а саме:

- встановлено, що використання алгоритму адаптації параметрів мережі стандарту 5G з мережею Інтернету речей, який передбачає розрахунок скінченної множини альтернативних варіантів структури мережі, дозволяє особі, яка приймає рішення, приймати найкращі альтернативні варіанти структури мережі IoT за критерієм якості обслуговування в мережі 5G.

- розроблена концептуальна модель мережі стандарту 5G з наданням сервісів Інтернету речей, яка враховує особливості пристроїв IoT щодо автономного зв'язку між великою кількістю розумних пристроїв, які одночасно надсилають невеликі пакети даних та використовуючи широкий спектр програм, що вимагає інфраструктури, різної з точки зору розміру пакетів, щільності трафіку та якості обслуговування.

Запропоновані методи було використано під час впровадження програмно-апаратних засобів, що дозволяє розраховувати параметри якості обслуговування запитів в мережі Інтернету речей.

Голова комісії:
 Члени комісії:


 О.В. Балаба

 М.П. Литвин

 Л.Д. Бакалова



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Повітрофлотський пр. 31, м. Київ-37, 03037, тел. (044)241-55-80, факс (044) 248-32-65
E-mail: knuba_admin@ukr.net, Web: http:// www.knuba.edu.ua, код ЄДРПОУ 02070909

№ _____

На № 12 від 25.09.2023

Довідка

щодо впровадження результатів дисертаційного дослідження здобувача наукового ступеня доктора технічних наук

КАСІМА Наміра Хашіма Касіма

на тему: «Методологія забезпечення якості обслуговування IoT в мережі 5G»

Результати дисертаційного дослідження професора кафедри кібербезпеки та ком'ютерної інженерії КАСІМА Наміра Хашіма Касіма на тему: «Методологія забезпечення якості обслуговування IoT в мережі 5G» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – «Телекомунікаційні системи та мережі» впроваджені в діяльність Київського національного університету будівництва і архітектури.

Пропозиції розроблені дисертантом використано у навчальному процесі Київського національного університету будівництва і архітектури, зокрема привикладанні дисциплін: «Ком'ютерні системи та мережі» та «Технології віртуалізації».

Також слушною є пропозиція щодо застосування нових навчальних дисциплін, серед яких: «Захист інформації в Інтернеті речей», «Хмарні обчислення» та інші.

Проректор з навчально-методичної роботи
Київського національного університету будівництва і архітектури:



Андрій ШПАКОВ

No.: 20
Date: 11/2/2024



العدد: 20
التاريخ: 11/2/2024

Al-Rafidain University College

Certificate

Regarding the implementation of the results of the dissertation research of the recipient of the scientific degree of Doctor of Technical Sciences QASIM Nameer Hashim Qasim on the topic: "Methodology for ensuring the quality of IoT service in the 5G network"

The results of the dissertation research of QASIM Nameer Hashim Qasim on the topic: "Methodology for ensuring the quality of IoT service in the 5G network" for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.12.02 - "Telecommunication systems and networks" have been implemented Al-Rafidain University College (Baghdad, Iraq).

The following experiment was conducted.

An aircraft segment is one or more UAVs. Each device of the aircraft segment is responsible for receiving, storing and transmitting information between the nodes of the ground segment, and also allows them to connect to the LSM. In the role of the ground segment of the network, sensor nodes (sensors, terminal devices) are used, which are installed on the ground (Fig. 1) and, using wireless technology, have the possibility of communication both between the elements of the ground segment and with the elements of the aircraft segment. Most often, these are IoT devices, so in the future, the elements of the ground segment will be depicted as IoT.

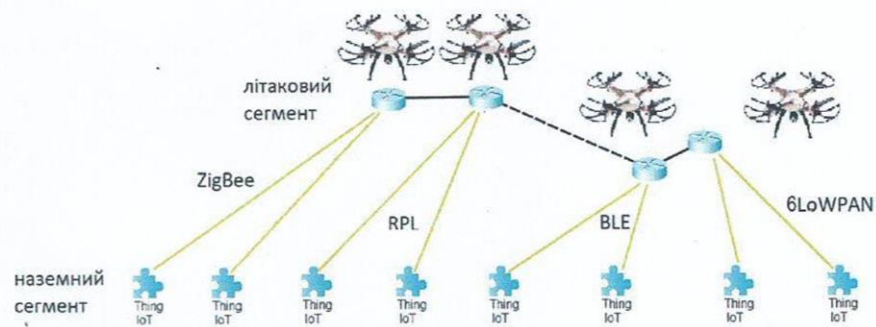


Figure 1. Architectural representation of flying sensor networks



No.: 20
Date: 11/2/2021



العدد: 20
التاريخ: 11/2/2021

Al-Rafidain University College

These nodes collect information and, if necessary, manage a remote object, work in autonomous mode, have small sizes and can be in sleep mode for a long time. They can collect data about humidity, temperature, noise, pressure, lighting, etc. Sensor nodes form fields of sensors (sensor fields), which make it possible to monitor various physical processes by all sensors at the same time.

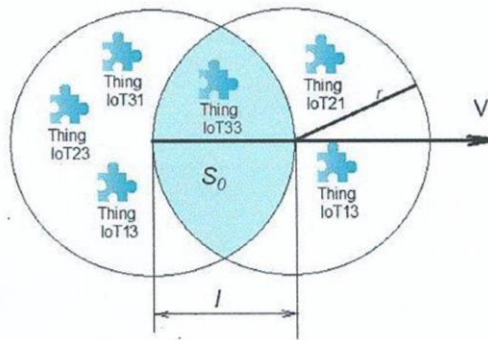


Figure 2. The area of the UAV service area during movement

Dr. Aqeel Mahmood Jawad
Director of Research Center
Al-Rafidain University College
Baghdad, Iraq



ДОДАТОК Г
МОДЕЛЬ ВХІДНОГО ПОТОКУ ЗАПИТІВ ВІД КІНЦЕВИХ ІОТ-
ПРИСТРОЇВ ДО МАРШРУТИЗАТОРА

```

*****
*
* Моделювання пуассонівського потоку запитів від пристроїв IoT
*
* Програмист КАСІМ НАМІР ХАШІМ
* 10.06.2022
*****
WAIT1 QTABLE ZR,1,1,10
WAIT2 QTABLE ZED,0,10,18
* Імітація безперервної випадкової величини за допомогою кусочно-лінійної
апроксимації безперервної функції
* Рядки функції розподілені за експоненційним законом з параметром 1/b
EXPON_LAMBDA FUNCTION RN1,C24 ;Розподіл для λ

0,0/.100,.104/.200,.222/.300,.355/.400,.509/.500,.690/.600,.915/.700,1.200/.7
50,1.380/.800,1.600/.840,1.830

.880,2.120/.900,2.300/.920,2.520/.940,2.810/.950,2.990/.960,3.200/.970,3.500/
.980,3.900/.990,4.600
.995,5.300/.998,6.200/.999,7/1,8
EXPON_MU FUNCTION RN2,C24 ;Розподіл для μ

0,0/.100,.104/.200,.222/.300,.355/.400,.509/.500,.690/.600,.915/.700,1.200/.7
50,1.380/.800,1.600/.840,1.830

.880,2.120/.900,2.300/.920,2.520/.940,2.810/.950,2.990/.960,3.200/.970,3.500/
.980,3.900/.990,4.600
.995,5.300/.998,6.200/.999,7/1,8
* Блок GENERATE забезпечує імітацію пуассонівського потоку (с)
GENERATE FN$EXPON_LAMBDA,0
* Фізичні пристрої IoT слід розглядати тільки як джерело потоку інтенсивністю
λ
QUEUE ZED ;IoT-пристрій готов здійснити запис даних в
буфер роутеру ZR
* Дисципліна обслуговування черги типу FIFO
SEIZE ZR ;Запис даних від IoT-пристрою в буфер роутеру
ZR
QUEUE ZR
* З чергою необмеженого розміру (без втрат)
DEPART ZED ;IoT-пристрій записав дані в буфер роутеру ZR
* Інтенсивність μ обслуговування має експоненційний закон розподілу
ADVANCE FN$EXPON_MU,0 ;Час гіперкадру на передачу даних від всіх
IoT-пристроїв
RELEASE ZR ;Буфер IoT-пристрою в роутері ZR звільнено
для запису наступних даних від IoT-пристрою
DEPART ZR
TERMINATE 0 ;Очикування наступних даних від IoT-пристрою
TIME GENERATE 10000 ;Одиниця моделювання: мс
TERMINATE 1 ;Закінчити на протязі 1 години

```

ДОДАТОК Д
РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ВХІДНОГО ПОТОКУ ЗАПИТІВ ВІД
КІНЦЕВИХ ІОТ-ПРИСТРОЇВ ДО МАРШРУТИЗАТОРА ЗА РОЗПОДІЛОМ
ПУАССОНА

GPSS World Simulation Report - IoT_Пуассон.42.1

Tuesday, May 01, 2023 01:27:20

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	10000.000	11	1	0

NAME	VALUE
EXPON_LAMBDA	10005.000
EXPON_MU	10006.000
TIME	10.000
WAIT1	10000.000
WAIT2	10002.000
WAIT3	10004.000
ZED	10003.000
ZR	10001.000

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
	1	GENERATE	9870	0	0
	2	QUEUE	9870	109	0
	3	SEIZE	9761	0	0
	4	QUEUE	9761	0	0
	5	DEPART	9761	0	0
	6	ADVANCE	9761	1	0
	7	RELEASE	9760	0	0
	8	DEPART	9760	0	0
	9	TERMINATE	9760	0	0
TIME	10	GENERATE	1	0	0
	11	TERMINATE	1	0	0

FACILITY DELAY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY
ZR 109	9761	0.985	1.009	1	9762	0	0	0

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY (0)	AVE. CONT.	AVE. TIME	AVE. (-0)	RETRY
ZR	1	1	9761	0	0.985	1.009	1.009	0
ZED	162	109	9870	135	63.779	64.619	65.515	0

TABLE	MEAN	STD. DEV.	RANGE	RETRY	FREQUENCY	CUM. %
WAIT1	1.009	1.008	0.000 - 10.000	0	9760	100.00
WAIT2	64.773	42.935	0.000 - 80.000	0	135	1.38
			0.000 - 10.000		1143	13.09
			10.000 - 20.000		864	21.94
			20.000 - 30.000		703	29.15
			30.000 - 40.000		657	35.88
			40.000 - 50.000		247	38.41
			50.000 - 60.000		415	42.66
			60.000 - 70.000		1247	55.43
			70.000 - 80.000		600	61.58

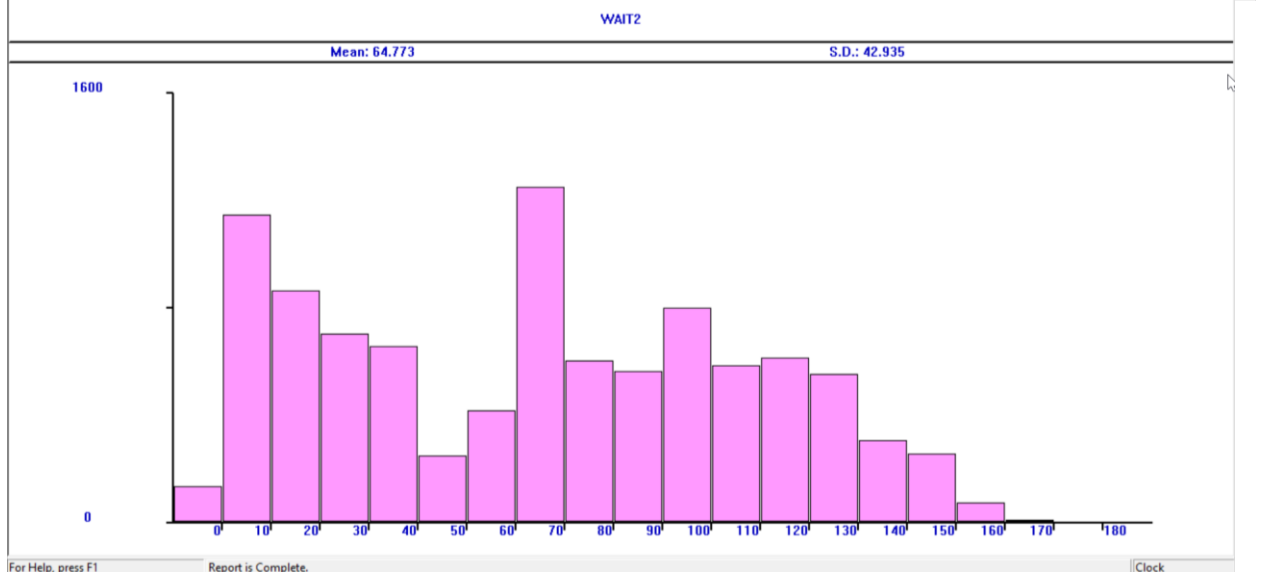
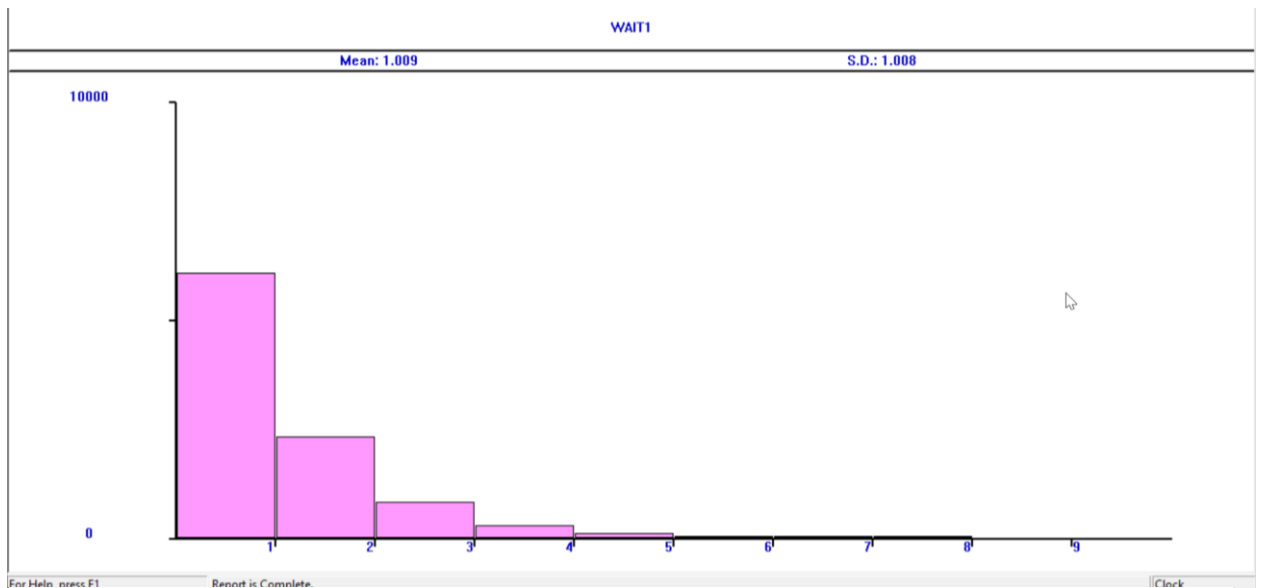
		80.000	-	90.000	563	67.35
		90.000	-	100.000	799	75.54
		100.000	-	110.000	584	81.52
		110.000	-	120.000	614	87.81
		120.000	-	130.000	553	93.47
		130.000	-	140.000	306	96.61
		140.000	-	150.000	256	99.23
		150.000	-	160.000	72	99.97
		160.000	-	170.000	3	100.00
WAIT3	64.773	42.935			0	
			-	0.100	144	1.48
			0.100	-	10	1.58
			0.200	-	18	1.76
			0.300	-	13	1.90
			0.400	-	13	2.03
			0.500	-	12	2.15
			0.600	-	6	2.21
			0.700	-	9	2.31
			0.800	-	15	2.46
			0.900	-	15	2.61
			1.000	-	15	2.77
			1.100	-	13	2.90
			1.200	-	14	3.04
			1.300	-	13	3.18
			1.400	-	14	3.32
			1.500	-	12	3.44
			1.600	-	14	3.59
			1.700	-	16	3.75
			1.800	-	13	3.88
			1.900	-	16	4.05
			2.000	-	12	4.17
			2.100	-	19	4.36
			2.200	-	16	4.53
			2.300	-	14	4.67
			2.400	-	10	4.77
			2.500	-	16	4.94
			2.600	-	18	5.12
			2.700	-	15	5.28
			2.800	-	10	5.38
			2.900	-	11	5.49
			3.000	-	13	5.62
			3.100	-	13	5.76
			3.200	-	10	5.86
			3.300	-	10	5.96
			3.400	-	19	6.16
			3.500	-	18	6.34
			3.600	-	11	6.45
			3.700	-	8	6.54
			3.800	-	21	6.75
			3.900	-	13	6.88
			4.000	-	17	7.06
			4.100	-	10	7.16
			4.200	-	14	7.30
			4.300	-	16	7.47
			4.400	-	11	7.58
			4.500	-	17	7.76
			4.600	-	12	7.88
			4.700	-	17	8.05
			4.800	-	14	8.20
			4.900	-	5	8.25
			5.000	-	11	8.36
			5.100	-	13	8.49
			5.200	-	17	8.67
			5.300	-	12	8.79

5.400	-	5.500	14	8.93
5.500	-	5.600	10	9.04
5.600	-	5.700	15	9.19
5.700	-	5.800	8	9.27
5.800	-	5.900	12	9.39
5.900	-	6.000	12	9.52
6.000	-	6.100	10	9.62
6.100	-	6.200	9	9.71
6.200	-	6.300	16	9.88
6.300	-	6.400	8	9.96
6.400	-	6.500	8	10.04
6.500	-	6.600	9	10.13
6.600	-	6.700	5	10.18
6.700	-	6.800	10	10.29
6.800	-	6.900	3	10.32
6.900	-	7.000	11	10.43
7.000	-	7.100	13	10.56
7.100	-	7.200	9	10.65
7.200	-	7.300	4	10.70
7.300	-	7.400	16	10.86
7.400	-	7.500	7	10.93
7.500	-	7.600	11	11.04
7.600	-	7.700	4	11.08
7.700	-	7.800	8	11.17
7.800	-	7.900	7	11.24
7.900	-	8.000	8	11.32
8.000	-	8.100	7	11.39
8.100	-	8.200	6	11.45
8.200	-	8.300	7	11.53
8.300	-	8.400	11	11.64
8.400	-	8.500	6	11.70
8.500	-	8.600	10	11.80
8.600	-	8.700	5	11.85
8.700	-	8.800	7	11.93
8.800	-	8.900	8	12.01
8.900	-	9.000	10	12.11
9.000	-	9.100	9	12.20
9.100	-	9.200	9	12.29
9.200	-	9.300	12	12.42
9.300	-	9.400	13	12.55
9.400	-	9.500	12	12.67
9.500	-	9.600	10	12.78
9.600	-	9.700	8	12.86
9.700	-	9.800	10	12.96
9.800	-	9.900	7	13.03
9.900	-	10.000	6	13.09
10.000	-	10.100	12	13.22
10.100	-	10.200	7	13.29
10.200	-	10.300	10	13.39
10.300	-	10.400	9	13.48
10.400	-	10.500	11	13.59
10.500	-	10.600	8	13.68
10.600	-	10.700	12	13.80
10.700	-	10.800	5	13.85
10.800	-	10.900	8	13.93
10.900	-	11.000	4	13.97
11.000	-	11.100	4	14.01
11.100	-	11.200	8	14.10
11.200	-	11.300	8	14.18
11.300	-	11.400	6	14.24
11.400	-	11.500	2	14.26
11.500	-	11.600	9	14.35
11.600	-	11.700	4	14.39
11.700	-	11.800	8	14.48

11.800	-	11.900	9	14.57
11.900	-	12.000	13	14.70
12.000	-	12.100	8	14.78
12.100	-	12.200	6	14.84
12.200	-	12.300	5	14.90
12.300	-	12.400	12	15.02
12.400	-	12.500	12	15.14
12.500	-	12.600	7	15.21
12.600	-	12.700	5	15.26
12.700	-	12.800	11	15.38
12.800	-	12.900	9	15.47
12.900	-	13.000	13	15.60
13.000	-	13.100	17	15.78
13.100	-	13.200	15	15.93
13.200	-	13.300	12	16.05
13.300	-	13.400	8	16.14
13.400	-	13.500	14	16.28
13.500	-	13.600	6	16.34
13.600	-	13.700	3	16.37
13.700	-	13.800	10	16.47
13.800	-	13.900	8	16.56
13.900	-	14.000	13	16.69
14.000	-	14.100	7	16.76
14.100	-	14.200	13	16.89
14.200	-	14.300	14	17.04
14.300	-	14.400	14	17.18
14.400	-	14.500	14	17.32
14.500	-	14.600	9	17.42
14.600	-	14.700	11	17.53
14.700	-	14.800	11	17.64
14.800	-	14.900	9	17.73
14.900	-	15.000	15	17.89
15.000	-	15.100	9	17.98
15.100	-	15.200	7	18.05
15.200	-	15.300	9	18.14
15.300	-	15.400	12	18.27
15.400	-	15.500	7	18.34
15.500	-	15.600	12	18.46
15.600	-	15.700	7	18.53
15.700	-	15.800	8	18.61
15.800	-	15.900	11	18.73
15.900	-	16.000	8	18.81
16.000	-	16.100	10	18.91
16.100	-	16.200	5	18.96
16.200	-	16.300	9	19.06
16.300	-	16.400	11	19.17
16.400	-	16.500	4	19.21
16.500	-	16.600	7	19.28
16.600	-	16.700	9	19.37
16.700	-	16.800	7	19.44
16.800	-	16.900	7	19.52
16.900	-	17.000	9	19.61
17.000	-	17.100	7	19.68
17.100	-	17.200	7	19.75
17.200	-	17.300	5	19.80
17.300	-	17.400	8	19.89
17.400	-	17.500	9	19.98
17.500	-	17.600	6	20.04
17.600	-	17.700	10	20.14
17.700	-	17.800	5	20.19
17.800	-	17.900	13	20.33
17.900	-	18.000	16	20.49
18.000	-	18.100	8	20.57
18.100	-	18.200	8	20.65

18.200	-	18.300	6	20.72
18.300	-	18.400	6	20.78
18.400	-	18.500	7	20.85
18.500	-	18.600	8	20.93
18.600	-	18.700	5	20.98
18.700	-	18.800	11	21.09
18.800	-	18.900	8	21.18
18.900	-	19.000	6	21.24
19.000	-	19.100	11	21.35
19.100	-	19.200	10	21.45
19.200	-	19.300	7	21.52
19.300	-	19.400	13	21.66
19.400	-	19.500	4	21.70
19.500	-	19.600	7	21.77
19.600	-	19.700	4	21.81
19.700	-	19.800	6	21.87
19.800	-	19.900	3	21.90
19.900	-		7623	100.00

FEC XN	PRI	BDT	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
9872	0	10000.281	9872	0	1		
9762	0	10000.762	9762	6	7		
9873	0	20000.000	9873	0	10		



ДОДАТОК Е

МОДЕЛЬ ВХІДНОГО ПОТОКУ ЗАПИТІВ ВІД КІНЦЕВИХ ІОТ-ПРИСТРОЇВ ДО МАРШРУТИЗАТОРА ЗА РОЗПОДІЛОМ ПАРЕТО

; GPSS World Sample File - Pa/M/1/∞

```

*****
*
* Моделювання розподілу Парето для запитів від пристроїв IoT
*
* Програміст КАСІМ НАМІР ХАШІМ
* 30.09.2022
*****

VrObs1    TABLE MP2,0,1,60          ; Гістограма часу обслуговування пакетів

VrDelta   TABLE X$Delta,0,1,60      ; Гістограма розподілу значень інтервалів
                                           ; часу між пакетами Парето-трафіка

          INITIAL X$Time,0           ; Встановити початкове значення "Time",
                                           ; рівним нулю

VrOcher   QTABLE ZED,0,1,70         ; Гістограма часу надходження пакетів
                                           ; в черзі на обслуговування

Alpha     EQU 1.0001                ; Параметр форми розподілу Парето

k         EQU 1                      ; Коефіцієнт масштабу розподілу Парето

T_obs1    EQU 1                      ; Середній час обслуговування пакету

Fun       VARIABLE (AC1-X$Time)      ; Функція обрахування значення інтервалів
                                           ; часу "Delta" між чергами пакетів
                                           ; (різниця абсолютного модельного часу
                                           ; і збереженого значення комірки "Time")
                                           ; Блок генерації та обслуговування трафіка
                                           ; Парето

          GENERATE (k#(Uniform(1,0,1)+1E-6#Uniform(1,0,1))^-1/Alpha)
                                           ; Трафік з Парето розподілом
                                           ; інтервалів часу між пакетами з кроком
                                           ; дискретизації ε=10^-12

          SAVEVALUE Delta,V$Fun        ; Зберігти в комірку "Delta"
                                           ; значення, яке визначене за формулою "Fun"

          SAVEVALUE Time,AC1          ; Зберігти в комірку "Time" значення,
                                           ; яке дорівнює
                                           ; абсолютному модельному часу

          TABULATE VrDelta            ; Зберігти вобчислене значення змінної
                                           ; "Delta" в таблицю "VrDelta" для
                                           ; побудови гістограми розподілу

          MARK 2                      ; Зберігти в комірку "2" значення
                                           ; абсолютного модельного часу

          QUEUE ZED                   ; Зайняти одне місце в буфері "Ocher"

          SEIZE ZR                     ; Зайняти маршрутизатор

          DEPART ZED                  ; Звільнити одне місце в буфері "Ocher"

          ADVANCE (Exponential(45,0,T_obs1)) ; Математичне сподівання часу

```

```
                                ; обслуговування пакету  
                                ; в маршрутизаторі, яке дорівнює T_obs1  
  
RELEASE ZR                       ; Звільнити маршрутизатор  
  
SAVEVALUE 1,MP2                  ; Зберегти в комірку "1" значення  
                                ; різниці між абсолютним модельним часом  
                                ; та значенням з комірки "2"  
  
TABULATE VrObs1                 ; Зберегти в таблицю "VrObs1" значення  
                                ; отриманої різниці  
  
TERMINATE 1                      ; Закінчити обробку обслугованого пакету  
  
START 1000000                   ; Обслужити 1 млн. пакетів
```

ДОДАТОК Ж
РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ВХІДНОГО ПОТОКУ ЗАПИТІВ ВІД
КІНЦЕВИХ ІОТ-ПРИСТРОЇВ ДО МАРШРУТИЗАТОРА ЗА РОЗПОДІЛОМ
ПАРЕТО

GPSS World Simulation Report - IoT_Парето.56.1

Wednesday, May 03, 2023 18:22:54

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	14423150.415	13	1	0

NAME	VALUE
ALPHA	1.000
DELTA	10009.000
FUN	10008.000
K	1.000
TIME	10002.000
T_OBSL	1.000
VRDELTA	10001.000
VROBSL	10000.000
VROCHER	10003.000
ZED	10004.000
ZR	10010.000

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT	COUNT	RETRY
	1	GENERATE	1000000	0	0	0
	2	SAVEVALUE	1000000	0	0	0
	3	SAVEVALUE	1000000	0	0	0
	4	TABULATE	1000000	0	0	0
	5	MARK	1000000	0	0	0
	6	QUEUE	1000000	0	0	0
	7	SEIZE	1000000	0	0	0
	8	DEPART	1000000	0	0	0
	9	ADVANCE	1000000	0	0	0
	10	RELEASE	1000000	0	0	0
	11	SAVEVALUE	1000000	0	0	0
	12	TABULATE	1000000	0	0	0
	13	TERMINATE	1000000	0	0	0

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
ZR	1000000	0.069	0.998	1	0	0	0	0	0

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY (0)	AVE. CONT.	AVE. TIME	AVE. (-0)	RETRY
ZED	8	0	1000000	799542	0.017	0.251	1.252	0

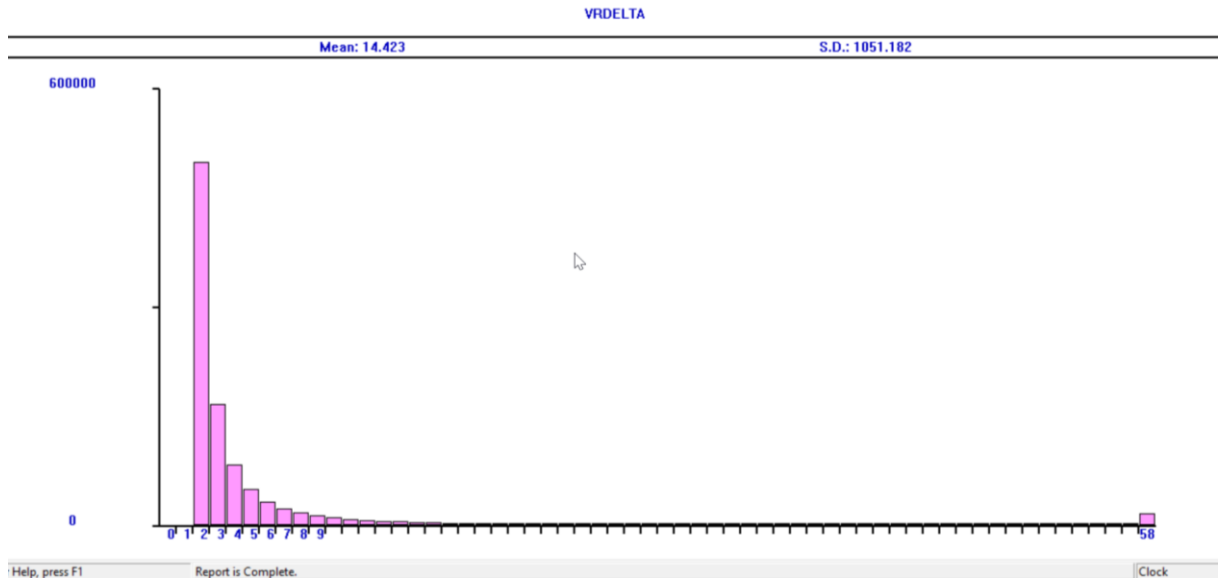
TABLE	MEAN	STD. DEV.	RANGE	RETRY	FREQUENCY	CUM. %
VROBSL	1.250	1.253		0		
			0.000 - 1.000		551186	55.12
			1.000 - 2.000		247189	79.84
			2.000 - 3.000		111182	90.96
			3.000 - 4.000		49648	95.92
			4.000 - 5.000		22287	98.15
			5.000 - 6.000		10204	99.17
			6.000 - 7.000		4466	99.62
			7.000 - 8.000		2078	99.82
			8.000 - 9.000		911	99.92

		9.000	-	10.000	476	99.96
		10.000	-	11.000	205	99.98
		11.000	-	12.000	87	99.99
		12.000	-	13.000	44	100.00
		13.000	-	14.000	21	100.00
		14.000	-	15.000	10	100.00
		15.000	-	16.000	4	100.00
		16.000	-	17.000	2	100.00
VRDELTA	14.423	1051.182			0	
		1.000	-	2.000	498699	49.87
		2.000	-	3.000	167180	66.59
		3.000	-	4.000	83688	74.96
		4.000	-	5.000	49981	79.95
		5.000	-	6.000	33233	83.28
		6.000	-	7.000	23900	85.67
		7.000	-	8.000	17914	87.46
		8.000	-	9.000	14003	88.86
		9.000	-	10.000	11102	89.97
		10.000	-	11.000	9214	90.89
		11.000	-	12.000	7553	91.65
		12.000	-	13.000	6397	92.29
		13.000	-	14.000	5479	92.83
		14.000	-	15.000	4828	93.32
		15.000	-	16.000	4249	93.74
		16.000	-	17.000	3645	94.11
		17.000	-	18.000	3287	94.44
		18.000	-	19.000	2937	94.73
		19.000	-	20.000	2658	94.99
		20.000	-	21.000	2444	95.24
		21.000	-	22.000	2205	95.46
		22.000	-	23.000	1970	95.66
		23.000	-	24.000	1871	95.84
		24.000	-	25.000	1638	96.01
		25.000	-	26.000	1524	96.16
		26.000	-	27.000	1405	96.30
		27.000	-	28.000	1328	96.43
		28.000	-	29.000	1314	96.56
		29.000	-	30.000	1102	96.67
		30.000	-	31.000	1075	96.78
		31.000	-	32.000	1026	96.88
		32.000	-	33.000	947	96.98
		33.000	-	34.000	899	97.07
		34.000	-	35.000	858	97.16
		35.000	-	36.000	817	97.24
		36.000	-	37.000	727	97.31
		37.000	-	38.000	750	97.38
		38.000	-	39.000	642	97.45
		39.000	-	40.000	648	97.51
		40.000	-	41.000	645	97.58
		41.000	-	42.000	585	97.64
		42.000	-	43.000	532	97.69
		43.000	-	44.000	509	97.74
		44.000	-	45.000	542	97.80
		45.000	-	46.000	455	97.84
		46.000	-	47.000	465	97.89
		47.000	-	48.000	461	97.93
		48.000	-	49.000	407	97.97
		49.000	-	50.000	383	98.01
		50.000	-	51.000	403	98.05
		51.000	-	52.000	407	98.09
		52.000	-	53.000	354	98.13
		53.000	-	54.000	347	98.16
		54.000	-	55.000	318	98.19
		55.000	-	56.000	340	98.23

		56.000	-	57.000	326	98.26
		57.000	-	58.000	289	98.29
VROCHER	0.251	58.000	-	-	17095	100.00
					0	
				0.000	799542	79.95
		0.000	-	1.000	110492	91.00
		1.000	-	2.000	49428	95.95
		2.000	-	3.000	22283	98.17
		3.000	-	4.000	9922	99.17
		4.000	-	5.000	4555	99.62
		5.000	-	6.000	2034	99.83
		6.000	-	7.000	940	99.92
		7.000	-	8.000	436	99.96
		8.000	-	9.000	189	99.98
		9.000	-	10.000	103	99.99
		10.000	-	11.000	41	100.00
		11.000	-	12.000	17	100.00
		12.000	-	13.000	12	100.00
		13.000	-	14.000	2	100.00
		14.000	-	15.000	3	100.00
		15.000	-	16.000	1	100.00

SAVEVALUE	RETRY	VALUE
1	0	1.393
TIME	0	14423149.022
DELTA	0	1.015

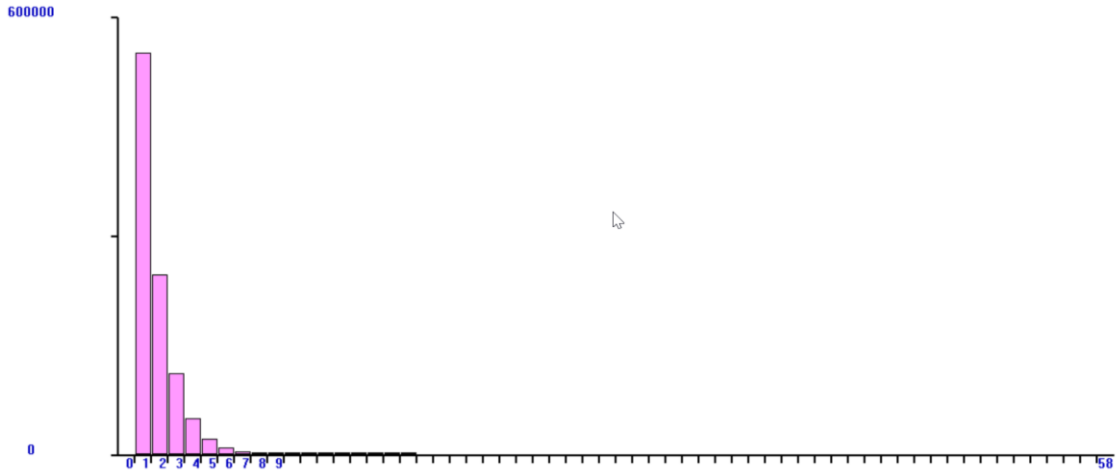
FEC XN	PRI	BDT	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
1000001	0	14423150.850	1000001	0	1		



VROBSL

Mean: 1.250

S.D.: 1.253

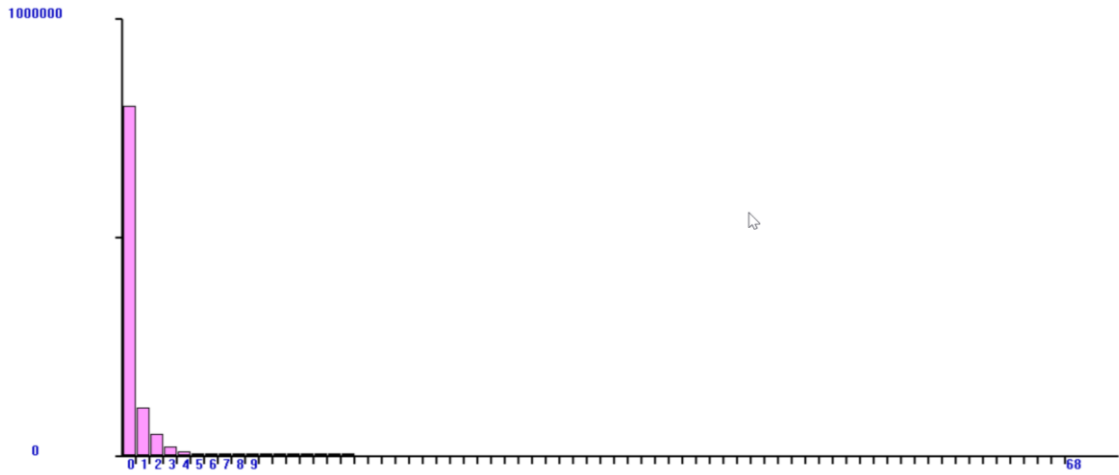


help, press F1 Report is Complete. Clock

VROCHER

Mean: 0.251

S.D.: 0.755



help, press F1 Report is Complete. Clock

ДОДАТОК 3

МОДЕЛЬ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗАПИТІВ В МЕРЕЖІ 5G

; GPSS World Sample File - 5G.GPS

```
*****
*
* Моделювання пріоритетного обслуговування в мережі 5G
*
* Програмист КАСІМ НАМІР ХАШІМ
* 05.12.2022
*****
```

```
WAIT_PR1 QTABLE 1,10,10,10
WAIT_PR2 QTABLE 2,10,10,14
WAIT_PR3 QTABLE 3,10,10,15
WAIT_PR4 QTABLE 4,10,10,22
WAIT_PR5 QTABLE 5,10,10,28
WAIT_PR6 QTABLE 6,10,10,36
WAIT_PR7 QTABLE 7,10,10,42
WAIT_PR8 QTABLE 8,10,10,48
WAIT_L1 QTABLE 9,10,10,54
WAIT_L2 QTABLE 10,10,10,56
WAIT_L3 QTABLE 11,10,10,51
WAIT_L4 QTABLE 12,10,10,49
```

EXPON FUNCTION RN1,C24

```
0,0/.100,.104/.200,.222/.300,.355/.400,.509/.500,.690/.600,.915/.700,1.200/.750,1.380/.800,1.600/.840,1.830.880,2.120/.900,2.300/.920,2.520/.940,2.810/.950,2.990/.960,3.200/.970,3.500/.980/,3.900/.990,4.600/.995,5.300/.998,6.200/.999,7/1,8
```

```
QFI1 GENERATE 100,FN$EXPON,,,9 ;Поток запитів пріоритету 1
TEST L Q1,1,VIDM1 ;Перевірка на перевищення часу затримки
; в черзі
QUEUE 1 ;Стати в чергу на обслуговування для
; запитів пріоритету 1
SEIZE P_GW ;Зайняти комутатор мережі 5G
DEPART 1 ;Вийти з черзі на обслуговування для
; запитів пріоритету 1
ADVANCE 10,FN$EXPON ;Час ослугування запитів пріоритету 1
RELEASE P_GW ;Звільнити комутатор мережі 5G
TERMINATE ;Запит обслуговуваний
VIDM1 TERMINATE ;Відмова в обслуговуванні запиту
; пріоритету 1
QFI2 GENERATE 100,FN$EXPON,,,8 ;Поток запитів пріоритету 2
TEST L Q2,3,VIDM2 ;Перевірка на перевищення часу затримки
; в черзі
QUEUE 2 ;Стати в чергу на обслуговування для
; запитів пріоритету 2
SEIZE P_GW ;Зайняти комутатор мережі 5G
DEPART 2 ;Вийти з черзі на обслуговування для
; запитів пріоритету 2
ADVANCE 10,FN$EXPON ;Час ослугування запитів пріоритету 2
RELEASE P_GW ;Звільнити комутатор мережі 5G
TERMINATE ;Запит обслуговуваний
VIDM2 TERMINATE ;Відмова в обслуговуванні запиту
```

```

приоритету 2
QFI3 GENERATE 100, FN$EXPON,,, 7 ;Поток запитів пріоритету 3
      TEST L Q3, 3, VIDM3 ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
      QUEUE 3 ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів пріоритету 3
      SEIZE P_GW ;Зайняти комутатор мережі 5G
      DEPART 3 ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 3
      ADVANCE 10, FN$EXPON ;Час ослуговування запитів пріоритету 3
      RELEASE P_GW ;Звільнити комутатор мережі 5G
      TERMINATE ;Запит обслуговуваний
VIDM3 TERMINATE ;Відмова в обслуговуванні запиту
приоритету 3
QFI4 GENERATE 100, FN$EXPON,,, 6 ;Поток запитів пріоритету 4
      TEST L Q4, 5, VIDM4 ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
      QUEUE 4 ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів пріоритету 4
      SEIZE P_GW ;Зайняти комутатор мережі 5G
      DEPART 4 ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 4
      ADVANCE 10, FN$EXPON ;Час ослуговування запитів пріоритету 4
      RELEASE P_GW ;Звільнити комутатор мережі 5G
      TERMINATE ;Запит обслуговуваний
VIDM4 TERMINATE 1 ;Відмова в обслуговуванні запиту
приоритету 4
QFI5 GENERATE 100, FN$EXPON,,, 5 ;Поток запитів пріоритету 5
      TEST L Q5, 6, VIDM5 ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
      QUEUE 5 ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів пріоритету 5
      SEIZE P_GW ;Зайняти комутатор мережі 5G
      DEPART 5 ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 5
      ADVANCE 11, FN$EXPON ;Час ослуговування запитів пріоритету 5
      RELEASE P_GW ;Звільнити комутатор мережі 5G
      TERMINATE ;Запит обслуговуваний
VIDM5 TERMINATE ;Відмова в обслуговуванні запиту
приоритету 5
QFI6 GENERATE 100, FN$EXPON,,, 4 ;Поток запитів пріоритету 6
      TEST L Q6, 10, VIDM6 ;Зайняти комутатор мережі 5G
      QUEUE 6 ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів пріоритету 6
      SEIZE P_GW ;Зайняти комутатор мережі 5G
      DEPART 6 ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 6
      ADVANCE 5, FN$EXPON ;Час ослуговування запитів пріоритету 6
      RELEASE P_GW ;Звільнити комутатор мережі 5G
      TERMINATE ;Запит обслуговуваний
VIDM6 TERMINATE ;Відмова в обслуговуванні запиту
приоритету 6
QFI7 GENERATE 100, FN$EXPON,,, 3 ;Поток запитів пріоритету 7
      TEST L Q7, 9, VIDM7 ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
      QUEUE 7
      QUEUE 7 ;Стати в чергу на обслуговування для

```



```

запитів пріоритету 7
    SEIZE      P_GW          ;Зайняти комутатор мережі 5G
    DEPART    7              ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 7
    ADVANCE   5, FN$EXPON    ;Час ослугування запитів пріоритету 7
    RELEASE   P_GW          ;Звільнити комутатор мережі 5G
    TERMINATE ;Запит обслуговуваний
VIDM7 TERMINATE ;Відмова в обслуговуванні запиту
пріоритету 7
QFI8 GENERATE 100, FN$EXPON,,,2 ;Поток запитів пріоритету 8
    TEST L Q8,10,VIDM8      ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
    QUEUE     8              ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів пріоритету 8
    SEIZE     P_GW          ;Зайняти комутатор мережі 5G
    DEPART    8              ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 8
    ADVANCE   5, FN$EXPON    ;Час ослугування запитів пріоритету 8
    RELEASE   P_GW          ;Звільнити комутатор мережі 5G
    TERMINATE ;Запит обслуговуваний
VIDM8 TERMINATE ;Відмова в обслуговуванні запиту
пріоритету 8
QFI9_L1 GENERATE 100, FN$EXPON,,,1 ;Поток запитів від IoT класу L1
    TEST L Q9,10,VIDM_L1    ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
    QUEUE     9              ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів від IoT класу L1
    SEIZE     P_GW          ;Зайняти комутатор мережі 5G
    DEPART    9              ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів від IoT класу L1
    ADVANCE   1, FN$EXPON    ;Час ослугування запитів від IoT класу
L1
    RELEASE   P_GW          ;Звільнити комутатор мережі 5G
    TERMINATE ;Запит від IoT класу L1 обслуговуваний
VIDM_L1 TERMINATE ;Відмова в обслуговуванні запиту від IoT
класу L1
QFI9_L2 GENERATE 100, FN$EXPON,,,1 ;Поток запитів від IoT класу L2
    TEST L Q10,10,VIDM_L2   ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
    QUEUE     10             ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів від IoT класу L2
    SEIZE     P_GW          ;Зайняти комутатор мережі 5G
    DEPART    10            ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів від IoT класу L2
    ADVANCE   1, FN$EXPON    ;Час ослугування запитів від IoT класу
L2
    RELEASE   P_GW          ;Звільнити комутатор мережі 5G
    TERMINATE ;Запит від IoT класу L2 обслуговуваний
VIDM_L2 TERMINATE ;Відмова в обслуговуванні запиту від IoT
класу L2
QFI9_L3 GENERATE 100, FN$EXPON,,,1 ;Поток запитів від IoT класу L3
    TEST L Q11,10,VIDM_L3   ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
    QUEUE     11             ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів від IoT класу L3
    SEIZE     P_GW          ;Зайняти комутатор мережі 5G

```


ДОДАТОК І

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗАПИТІВ В МЕРЕЖІ
5G

GPSS World Simulation Report - 5G.79.1

Saturday, May 01, 2023 16:26:22

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	1485916.346	110	1	0

NAME	VALUE
EXPON	10012.000
P_GW	10013.000
QFI1	1.000
QFI2	10.000
QFI3	19.000
QFI4	28.000
QFI5	37.000
QFI6	46.000
QFI7	55.000
QFI8	64.000
QFI9_L1	73.000
QFI9_L2	82.000
QFI9_L3	91.000
QFI9_L4	100.000
TIME	109.000
VIDM1	9.000
VIDM2	18.000
VIDM3	27.000
VIDM4	36.000
VIDM5	45.000
VIDM6	54.000
VIDM7	63.000
VIDM8	72.000
VIDM_L1	81.000
VIDM_L2	90.000
VIDM_L3	99.000
VIDM_L4	108.000
WAIT_L1	10008.000
WAIT_L2	10009.000
WAIT_L3	10010.000
WAIT_L4	10011.000
WAIT_PR1	10000.000
WAIT_PR2	10001.000
WAIT_PR3	10002.000
WAIT_PR4	10003.000
WAIT_PR5	10004.000
WAIT_PR6	10005.000
WAIT_PR7	10006.000
WAIT_PR8	10007.000

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT	COUNT	RETRY
QFI1	1	GENERATE	14809		0	0
	2	TEST	14809		0	0
	3	QUEUE	13998		1	0
	4	SEIZE	13997		0	0
	5	DEPART	13997		0	0
	6	ADVANCE	13997		0	0
	7	RELEASE	13997		0	0
	8	TERMINATE	13997		0	0
VIDM1	9	TERMINATE	811		0	0
QFI2	10	GENERATE	14695		0	0
	11	TEST	14695		0	0
	12	QUEUE	14682		0	0
	13	SEIZE	14682		0	0
	14	DEPART	14682		0	0

	15	ADVANCE	14682	0	0
	16	RELEASE	14682	0	0
	17	TERMINATE	14682	0	0
VIDM2	18	TERMINATE	13	0	0
QFI3	19	GENERATE	14805	0	0
	20	TEST	14805	0	0
	21	QUEUE	14779	0	0
	22	SEIZE	14779	0	0
	23	DEPART	14779	0	0
	24	ADVANCE	14779	1	0
	25	RELEASE	14778	0	0
	26	TERMINATE	14778	0	0
VIDM3	27	TERMINATE	26	0	0
QFI4	28	GENERATE	14843	0	0
	29	TEST	14843	0	0
	30	QUEUE	14842	5	0
	31	SEIZE	14837	0	0
	32	DEPART	14837	0	0
	33	ADVANCE	14837	0	0
	34	RELEASE	14837	0	0
	35	TERMINATE	14837	0	0
VIDM4	36	TERMINATE	1	0	0
QFI5	37	GENERATE	14762	0	0
	38	TEST	14762	0	0
	39	QUEUE	14750	1	0
	40	SEIZE	14749	0	0
	41	DEPART	14749	0	0
	42	ADVANCE	14749	0	0
	43	RELEASE	14749	0	0
	44	TERMINATE	14749	0	0
VIDM5	45	TERMINATE	12	0	0
QFI6	46	GENERATE	15076	0	0
	47	TEST	15076	0	0
	48	QUEUE	15073	0	0
	49	SEIZE	15073	0	0
	50	DEPART	15073	0	0
	51	ADVANCE	15073	0	0
	52	RELEASE	15073	0	0
	53	TERMINATE	15073	0	0
VIDM6	54	TERMINATE	3	0	0
QFI7	55	GENERATE	14767	0	0
	56	TEST	14767	0	0
	57	QUEUE	14766	1	0
	58	SEIZE	14765	0	0
	59	DEPART	14765	0	0
	60	ADVANCE	14765	0	0
	61	RELEASE	14765	0	0
	62	TERMINATE	14765	0	0
VIDM7	63	TERMINATE	1	0	0
QFI8	64	GENERATE	15023	0	0
	65	TEST	15023	0	0
	66	QUEUE	15002	0	0
	67	SEIZE	15002	0	0
	68	DEPART	15002	0	0
	69	ADVANCE	15002	0	0
	70	RELEASE	15002	0	0
	71	TERMINATE	15002	0	0
VIDM8	72	TERMINATE	21	0	0
QFI9_L1	73	GENERATE	14967	0	0
	74	TEST	14967	0	0
	75	QUEUE	14934	3	0
	76	SEIZE	14931	0	0
	77	DEPART	14931	0	0
	78	ADVANCE	14931	0	0
	79	RELEASE	14931	0	0
	80	TERMINATE	14931	0	0
VIDM_L1	81	TERMINATE	33	0	0
QFI9_L2	82	GENERATE	14781	0	0
	83	TEST	14781	0	0
	84	QUEUE	14749	0	0
	85	SEIZE	14749	0	0

	86	DEPART	14749	0	0
	87	ADVANCE	14749	0	0
	88	RELEASE	14749	0	0
	89	TERMINATE	14749	0	0
VIDM_L2	90	TERMINATE	32	0	0
QFI9_L3	91	GENERATE	14935	0	0
	92	TEST	14935	0	0
	93	QUEUE	14922	1	0
	94	SEIZE	14921	0	0
	95	DEPART	14921	0	0
	96	ADVANCE	14921	0	0
	97	RELEASE	14921	0	0
	98	TERMINATE	14921	0	0
VIDM_L3	99	TERMINATE	13	0	0
QFI9_L4	100	GENERATE	15159	0	0
	101	TEST	15159	0	0
	102	QUEUE	15140	0	0
	103	SEIZE	15140	0	0
	104	DEPART	15140	0	0
	105	ADVANCE	15140	0	0
	106	RELEASE	15140	0	0
	107	TERMINATE	15140	0	0
VIDM_L4	108	TERMINATE	19	0	0
TIME	109	GENERATE	0	0	0
	110	TERMINATE	0	0	0

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
P_GW	177625	0.692	5.792	1	178598	0	0	0	12

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY (0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY
1	1	1	13998	4615	0.054	5.689	8.487	0
2	3	0	14682	4562	0.078	7.936	11.514	0
3	3	0	14779	4486	0.100	10.078	14.471	0
4	5	5	14842	4551	0.133	13.305	19.189	0
5	6	1	14750	4581	0.193	19.443	28.202	0
6	10	0	15073	4577	0.268	26.431	37.956	0
7	9	1	14766	4506	0.314	31.618	45.504	0
8	10	0	15002	4640	0.417	41.312	59.812	0
9	10	3	14934	4560	0.535	53.279	76.699	0
10	10	0	14749	4520	0.533	53.689	77.413	0
11	10	1	14922	4583	0.520	51.761	74.705	0
12	10	0	15140	4675	0.541	53.086	76.801	0

TABLE	MEAN	STD.DEV.	RANGE	RETRY	FREQUENCY	CUM.%
WAIT_PR1	5.689	8.749	-	0		
			10.000		11201	80.02
			20.000		1777	92.72
			30.000		658	97.42
			40.000		223	99.01
			50.000		85	99.62
			60.000		33	99.86
			70.000		14	99.96
			80.000		5	99.99
			90.000		1	100.00
WAIT_PR2	7.936	12.267	-	0		
			10.000		10762	73.30
			20.000		2065	87.37
			30.000		919	93.62
			40.000		454	96.72
			50.000		239	98.34
			60.000		131	99.24
			70.000		58	99.63
			80.000		28	99.82
			90.000		18	99.95
			100.000		5	99.98
			110.000		2	99.99
			120.000		1	100.00
WAIT_PR3	10.078	16.427	-	0		

			-	10.000	10226	69.19
			10.000	20.000	2102	83.42
			20.000	30.000	1052	90.53
			30.000	40.000	564	94.35
			40.000	50.000	321	96.52
			50.000	60.000	178	97.73
			60.000	70.000	118	98.52
			70.000	80.000	91	99.14
			80.000	90.000	50	99.48
			90.000	100.000	27	99.66
			100.000	110.000	18	99.78
			110.000	120.000	7	99.83
			120.000	130.000	7	99.88
			130.000	140.000	7	99.93
			140.000	-	11	100.00
WAIT_PR4	13.295	22.618	-	-	0	
			-	10.000	9716	65.48
			10.000	20.000	1920	78.43
			20.000	30.000	1068	85.62
			30.000	40.000	670	90.14
			40.000	50.000	423	92.99
			50.000	60.000	293	94.97
			60.000	70.000	246	96.62
			70.000	80.000	144	97.59
			80.000	90.000	100	98.27
			90.000	100.000	67	98.72
			100.000	110.000	61	99.13
			110.000	120.000	32	99.35
			120.000	130.000	28	99.53
			130.000	140.000	19	99.66
			140.000	150.000	11	99.74
			150.000	160.000	17	99.85
			160.000	170.000	6	99.89
			170.000	180.000	2	99.91
			180.000	190.000	6	99.95
			190.000	200.000	2	99.96
			200.000	210.000	2	99.97
			210.000	-	4	100.00
WAIT_PR5	19.439	36.213	-	-	0	
			-	10.000	8990	60.95
			10.000	20.000	1732	72.70
			20.000	30.000	1064	79.91
			30.000	40.000	684	84.55
			40.000	50.000	517	88.05
			50.000	60.000	396	90.74
			60.000	70.000	278	92.62
			70.000	80.000	208	94.03
			80.000	90.000	136	94.96
			90.000	100.000	151	95.98
			100.000	110.000	103	96.68
			110.000	120.000	91	97.29
			120.000	130.000	78	97.82
			130.000	140.000	64	98.26
			140.000	150.000	43	98.55
			150.000	160.000	38	98.81
			160.000	170.000	34	99.04
			170.000	180.000	20	99.17
			180.000	190.000	21	99.32
			190.000	200.000	17	99.43
			200.000	210.000	11	99.51
			210.000	220.000	10	99.57
			220.000	230.000	6	99.61
			230.000	240.000	10	99.68
			240.000	250.000	5	99.72
			250.000	260.000	8	99.77
			260.000	270.000	5	99.80
			270.000	-	29	100.00
WAIT_PR6	26.431	51.030	-	-	0	
			-	10.000	8663	57.47
			10.000	20.000	1662	68.50
			20.000	30.000	1018	75.25

30.000	-	40.000	719	80.02
40.000	-	50.000	540	83.61
50.000	-	60.000	417	86.37
60.000	-	70.000	341	88.64
70.000	-	80.000	272	90.44
80.000	-	90.000	217	91.88
90.000	-	100.000	185	93.11
100.000	-	110.000	140	94.04
110.000	-	120.000	122	94.85
120.000	-	130.000	109	95.57
130.000	-	140.000	73	96.05
140.000	-	150.000	83	96.60
150.000	-	160.000	61	97.01
160.000	-	170.000	58	97.39
170.000	-	180.000	43	97.68
180.000	-	190.000	46	97.98
190.000	-	200.000	25	98.15
200.000	-	210.000	36	98.39
210.000	-	220.000	36	98.63
220.000	-	230.000	21	98.77
230.000	-	240.000	16	98.87
240.000	-	250.000	16	98.98
250.000	-	260.000	15	99.08
260.000	-	270.000	20	99.21
270.000	-	280.000	14	99.30
280.000	-	290.000	10	99.37
290.000	-	300.000	12	99.45
300.000	-	310.000	7	99.50
310.000	-	320.000	5	99.53
320.000	-	330.000	7	99.58
330.000	-	340.000	5	99.61
340.000	-	350.000	6	99.65
350.000	-	-	53	100.00
WAIT_PR7	31.616	61.565	0	
10.000	-	10.000	8223	55.69
10.000	-	20.000	1459	65.57
20.000	-	30.000	961	72.08
30.000	-	40.000	761	77.24
40.000	-	50.000	553	80.98
50.000	-	60.000	396	83.66
60.000	-	70.000	315	85.80
70.000	-	80.000	293	87.78
80.000	-	90.000	249	89.47
90.000	-	100.000	218	90.94
100.000	-	110.000	168	92.08
110.000	-	120.000	124	92.92
120.000	-	130.000	122	93.75
130.000	-	140.000	132	94.64
140.000	-	150.000	83	95.20
150.000	-	160.000	85	95.78
160.000	-	170.000	67	96.23
170.000	-	180.000	55	96.61
180.000	-	190.000	51	96.95
190.000	-	200.000	56	97.33
200.000	-	210.000	36	97.58
210.000	-	220.000	35	97.81
220.000	-	230.000	26	97.99
230.000	-	240.000	28	98.18
240.000	-	250.000	30	98.38
250.000	-	260.000	20	98.52
260.000	-	270.000	18	98.64
270.000	-	280.000	21	98.78
280.000	-	290.000	16	98.89
290.000	-	300.000	8	98.94
300.000	-	310.000	13	99.03
310.000	-	320.000	13	99.12
320.000	-	330.000	12	99.20
330.000	-	340.000	10	99.27
340.000	-	350.000	12	99.35
350.000	-	360.000	6	99.39
360.000	-	370.000	4	99.42

			370.000	-	380.000		9	99.48
			380.000	-	390.000		7	99.53
			390.000	-	400.000		6	99.57
			400.000	-	410.000		6	99.61
			410.000	-			58	100.00
WAIT_PR8	41.312	80.612		-		0		
				-	10.000		7818	52.11
			10.000	-	20.000		1410	61.51
			20.000	-	30.000		978	68.03
			30.000	-	40.000		748	73.02
			40.000	-	50.000		537	76.60
			50.000	-	60.000		448	79.58
			60.000	-	70.000		390	82.18
			70.000	-	80.000		292	84.13
			80.000	-	90.000		249	85.79
			90.000	-	100.000		247	87.44
			100.000	-	110.000		206	88.81
			110.000	-	120.000		160	89.87
			120.000	-	130.000		149	90.87
			130.000	-	140.000		136	91.77
			140.000	-	150.000		95	92.41
			150.000	-	160.000		109	93.13
			160.000	-	170.000		95	93.77
			170.000	-	180.000		76	94.27
			180.000	-	190.000		79	94.80
			190.000	-	200.000		63	95.22
			200.000	-	210.000		53	95.57
			210.000	-	220.000		55	95.94
			220.000	-	230.000		49	96.27
			230.000	-	240.000		50	96.60
			240.000	-	250.000		39	96.86
			250.000	-	260.000		36	97.10
			260.000	-	270.000		34	97.33
			270.000	-	280.000		35	97.56
			280.000	-	290.000		36	97.80
			290.000	-	300.000		29	97.99
			300.000	-	310.000		17	98.11
			310.000	-	320.000		20	98.24
			320.000	-	330.000		15	98.34
			330.000	-	340.000		16	98.45
			340.000	-	350.000		15	98.55
			350.000	-	360.000		14	98.64
			360.000	-	370.000		12	98.72
			370.000	-	380.000		17	98.83
			380.000	-	390.000		22	98.98
			390.000	-	400.000		9	99.04
			400.000	-	410.000		6	99.08
			410.000	-	420.000		14	99.17
			420.000	-	430.000		7	99.22
			430.000	-	440.000		7	99.27
			440.000	-	450.000		10	99.33
			450.000	-	460.000		7	99.38
			460.000	-	470.000		10	99.45
			470.000	-			83	100.00
WAIT_L1	53.285	103.721		-		0		
				-	10.000		7203	48.24
			10.000	-	20.000		1349	57.28
			20.000	-	30.000		940	63.57
			30.000	-	40.000		704	68.29
			40.000	-	50.000		602	72.32
			50.000	-	60.000		460	75.40
			60.000	-	70.000		406	78.12
			70.000	-	80.000		317	80.24
			80.000	-	90.000		304	82.28
			90.000	-	100.000		222	83.77
			100.000	-	110.000		228	85.29
			110.000	-	120.000		192	86.58
			120.000	-	130.000		172	87.73
			130.000	-	140.000		128	88.59
			140.000	-	150.000		119	89.38
			150.000	-	160.000		128	90.24

160.000	-	170.000	109	90.97
170.000	-	180.000	108	91.70
180.000	-	190.000	89	92.29
190.000	-	200.000	92	92.91
200.000	-	210.000	79	93.44
210.000	-	220.000	59	93.83
220.000	-	230.000	65	94.27
230.000	-	240.000	49	94.60
240.000	-	250.000	48	94.92
250.000	-	260.000	47	95.23
260.000	-	270.000	51	95.57
270.000	-	280.000	34	95.80
280.000	-	290.000	47	96.12
290.000	-	300.000	41	96.39
300.000	-	310.000	39	96.65
310.000	-	320.000	36	96.89
320.000	-	330.000	27	97.07
330.000	-	340.000	27	97.25
340.000	-	350.000	25	97.42
350.000	-	360.000	31	97.63
360.000	-	370.000	19	97.76
370.000	-	380.000	14	97.85
380.000	-	390.000	29	98.04
390.000	-	400.000	22	98.19
400.000	-	410.000	8	98.25
410.000	-	420.000	11	98.32
420.000	-	430.000	16	98.43
430.000	-	440.000	16	98.53
440.000	-	450.000	10	98.60
450.000	-	460.000	8	98.65
460.000	-	470.000	9	98.71
470.000	-	480.000	19	98.84
480.000	-	490.000	14	98.94
490.000	-	500.000	12	99.02
500.000	-	510.000	9	99.08
510.000	-	520.000	8	99.13
520.000	-	530.000	9	99.19
530.000	-		121	100.00
WAIT_L2	53.689	103.397	0	
10.000	-	10.000	7145	48.44
20.000	-	20.000	1387	57.85
30.000	-	30.000	882	63.83
40.000	-	40.000	660	68.30
50.000	-	50.000	579	72.23
60.000	-	60.000	433	75.16
70.000	-	70.000	374	77.70
80.000	-	80.000	329	79.93
90.000	-	90.000	282	81.84
100.000	-	100.000	251	83.54
110.000	-	110.000	216	85.01
120.000	-	120.000	183	86.25
130.000	-	130.000	163	87.36
140.000	-	140.000	133	88.26
150.000	-	150.000	138	89.19
160.000	-	160.000	128	90.06
170.000	-	170.000	106	90.78
180.000	-	180.000	114	91.55
190.000	-	190.000	95	92.20
200.000	-	200.000	95	92.84
210.000	-	210.000	69	93.31
220.000	-	220.000	75	93.82
230.000	-	230.000	61	94.23
240.000	-	240.000	55	94.60
250.000	-	250.000	50	94.94
260.000	-	260.000	57	95.33
270.000	-	270.000	37	95.58
280.000	-	280.000	37	95.83
290.000	-	290.000	36	96.07
300.000	-	300.000	37	96.33
310.000	-	310.000	41	96.60
320.000	-	320.000	37	96.85

				320.000	-	330.000		18	96.98
				330.000	-	340.000		27	97.16
				340.000	-	350.000		26	97.34
				350.000	-	360.000		21	97.48
				360.000	-	370.000		16	97.59
				370.000	-	380.000		20	97.72
				380.000	-	390.000		15	97.82
				390.000	-	400.000		16	97.93
				400.000	-	410.000		15	98.03
				410.000	-	420.000		18	98.16
				420.000	-	430.000		16	98.26
				430.000	-	440.000		16	98.37
				440.000	-	450.000		19	98.50
				450.000	-	460.000		15	98.60
				460.000	-	470.000		10	98.67
				470.000	-	480.000		12	98.75
				480.000	-	490.000		16	98.86
				490.000	-	500.000		14	98.96
				500.000	-	510.000		6	99.00
				510.000	-	520.000		5	99.03
				520.000	-	530.000		9	99.09
				530.000	-	540.000		8	99.15
				540.000	-	550.000		9	99.21
				550.000	-			117	100.00
WAIT_L3	51.760	99.686			-		0		
					-	10.000		7343	49.21
				10.000	-	20.000		1301	57.93
				20.000	-	30.000		920	64.10
				30.000	-	40.000		710	68.86
				40.000	-	50.000		560	72.61
				50.000	-	60.000		491	75.90
				60.000	-	70.000		378	78.43
				70.000	-	80.000		322	80.59
				80.000	-	90.000		271	82.41
				90.000	-	100.000		214	83.84
				100.000	-	110.000		205	85.22
				110.000	-	120.000		189	86.48
				120.000	-	130.000		156	87.53
				130.000	-	140.000		155	88.57
				140.000	-	150.000		123	89.39
				150.000	-	160.000		143	90.35
				160.000	-	170.000		132	91.23
				170.000	-	180.000		111	91.98
				180.000	-	190.000		70	92.45
				190.000	-	200.000		87	93.03
				200.000	-	210.000		81	93.57
				210.000	-	220.000		81	94.12
				220.000	-	230.000		57	94.50
				230.000	-	240.000		53	94.85
				240.000	-	250.000		56	95.23
				250.000	-	260.000		55	95.60
				260.000	-	270.000		53	95.95
				270.000	-	280.000		41	96.23
				280.000	-	290.000		48	96.55
				290.000	-	300.000		45	96.85
				300.000	-	310.000		31	97.06
				310.000	-	320.000		26	97.23
				320.000	-	330.000		30	97.43
				330.000	-	340.000		21	97.57
				340.000	-	350.000		24	97.73
				350.000	-	360.000		24	97.90
				360.000	-	370.000		16	98.00
				370.000	-	380.000		21	98.14
				380.000	-	390.000		10	98.21
				390.000	-	400.000		19	98.34
				400.000	-	410.000		12	98.42
				410.000	-	420.000		11	98.49
				420.000	-	430.000		9	98.55
				430.000	-	440.000		12	98.63
				440.000	-	450.000		15	98.73
				450.000	-	460.000		16	98.84

			460.000	-	470.000		9	98.90
			470.000	-	480.000		10	98.97
			480.000	-	490.000		8	99.02
			490.000	-	500.000		7	99.07
			500.000	-			139	100.00
WAIT_L4		53.086	101.207	-		0		
				-	10.000		7425	49.04
			10.000	-	20.000		1300	57.63
			20.000	-	30.000		903	63.59
			30.000	-	40.000		666	67.99
			40.000	-	50.000		552	71.64
			50.000	-	60.000		472	74.76
			60.000	-	70.000		401	77.40
			70.000	-	80.000		357	79.76
			80.000	-	90.000		272	81.56
			90.000	-	100.000		283	83.43
			100.000	-	110.000		216	84.85
			110.000	-	120.000		198	86.16
			120.000	-	130.000		175	87.32
			130.000	-	140.000		146	88.28
			140.000	-	150.000		153	89.29
			150.000	-	160.000		130	90.15
			160.000	-	170.000		128	91.00
			170.000	-	180.000		107	91.70
			180.000	-	190.000		86	92.27
			190.000	-	200.000		93	92.89
			200.000	-	210.000		91	93.49
			210.000	-	220.000		54	93.84
			220.000	-	230.000		72	94.32
			230.000	-	240.000		61	94.72
			240.000	-	250.000		66	95.16
			250.000	-	260.000		54	95.52
			260.000	-	270.000		51	95.85
			270.000	-	280.000		38	96.10
			280.000	-	290.000		40	96.37
			290.000	-	300.000		37	96.61
			300.000	-	310.000		48	96.93
			310.000	-	320.000		31	97.13
			320.000	-	330.000		31	97.34
			330.000	-	340.000		26	97.51
			340.000	-	350.000		27	97.69
			350.000	-	360.000		18	97.81
			360.000	-	370.000		22	97.95
			370.000	-	380.000		13	98.04
			380.000	-	390.000		15	98.14
			390.000	-	400.000		13	98.22
			400.000	-	410.000		14	98.32
			410.000	-	420.000		15	98.41
			420.000	-	430.000		15	98.51
			430.000	-	440.000		10	98.58
			440.000	-	450.000		12	98.66
			450.000	-	460.000		11	98.73
			460.000	-	470.000		8	98.78
			470.000	-	480.000		8	98.84
			480.000	-			176	100.00

FEC XN	PRI	BDT	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
178624	1	1485919.452	178624	0	91		
178598	7	1485922.668	178598	24	25		
178626	7	1485930.672	178626	0	19		
178623	3	1485932.849	178623	0	55		
178633	1	1485946.920	178633	0	73		
178614	1	1485960.090	178614	0	82		
178634	9	1485965.194	178634	0	1		
178621	5	1486007.400	178621	0	37		
178615	4	1486053.756	178615	0	46		
178635	6	1486053.769	178635	0	28		
178616	2	1486053.978	178616	0	64		
178610	1	1486107.495	178610	0	100		
178625	8	1486327.104	178625	0	10		
13	0	3600000.000	13	0	109		

ДОДАТОК К
МОДЕЛЬ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗАПИТІВ ВІД ІОТ-ПРИСТРОЇВ
В МЕРЕЖІ 5G

```

; GPSS World Sample File - 5G+Алгоритм.GPS
*****
*
* Моделювання запропонованого алгоритма обслуговування IoT-пристроїв *
* в мережі 5G *
*
* Програмист КАСІМ НАМІР ХАШІМ *
* 15.12.2022 *
*****

WAIT_PR1 QTABLE 1,10,10,10
WAIT_PR2 QTABLE 2,10,10,14
WAIT_PR3 QTABLE 3,10,10,15
WAIT_PR4 QTABLE 4,10,10,22
WAIT_PR5 QTABLE 5,10,10,28
WAIT_PR6 QTABLE 6,10,10,36
WAIT_PR7 QTABLE 7,10,10,42
WAIT_PR8 QTABLE 8,10,10,48
WAIT_L1 QTABLE 9,10,10,54
WAIT_L2 QTABLE 10,10,10,56
WAIT_L3 QTABLE 11,10,10,51
WAIT_L4 QTABLE 12,10,10,49

EXPON FUNCTION RN1,C24

0,0/.100,.104/.200,.222/.300,.355/.400,.509/.500,.690/.600,.915/.700,1.200/.7
50,1.380/.800,1.600/.840,1.830

.880,2.120/.900,2.300/.920,2.520/.940,2.810/.950,2.990/.960,3.200/.970,3.500/
.980,3.900/.990,4.600
.995,5.300/.998,6.200/.999,7/1,8
QFI1 GENERATE 100, FN$EXPON,,,9 ;Поток запитів пріоритету 1
ENTER_9 TEST L Q1,1,VIDM1 ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
QUEUE 1 ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів пріоритету 1
SEIZE P_GW ;Зайняти комутатор мережі 5G
DEPART 1 ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 1
ADVANCE 10, FN$EXPON ;Час ослугування запитів пріоритету 1
RELEASE P_GW ;Звільнити комутатор мережі 5G
TERMINATE ;Запит обслуговуваний
VIDM1 TERMINATE ;Відмова в обслуговуванні запиту
пріоритету 1
QFI2 GENERATE 100, FN$EXPON,,,8 ;Поток запитів пріоритету 2
ENTER_8 TEST L Q2,3,VIDM2 ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
QUEUE 2 ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів пріоритету 2
SEIZE P_GW ;Зайняти комутатор мережі 5G
DEPART 2 ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 2
ADVANCE 10, FN$EXPON ;Час ослугування запитів пріоритету 2
RELEASE P_GW ;Звільнити комутатор мережі 5G
TERMINATE ;Запит обслуговуваний
VIDM2 TERMINATE ;Відмова в обслуговуванні запиту
пріоритету 2
QFI3 GENERATE 100, FN$EXPON,,,7 ;Поток запитів пріоритету 3
ENTER_7 TEST L Q3,3,VIDM3 ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі

```

```

        QUEUE      3                                ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів пріоритету 3
        SEIZE      P_GW                            ;Зайняти комутатор мережі 5G
        DEPART     3                                ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 3
        ADVANCE    10, FN$EXPON                    ;Час ослугування запитів пріоритету 3
        RELEASE    P_GW                            ;Звільнити комутатор мережі 5G
        TERMINATE                                     ;Запит обслуговуваний
VIDM3 TERMINATE                                     ;Відмова в обслуговуванні запиту
пріоритету 3
QFI4  GENERATE    100, FN$EXPON, , , 6            ;Поток запитів пріоритету 4
        TEST L Q4, 5, VIDM4                       ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
        QUEUE      4                                ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів пріоритету 4
        SEIZE      P_GW                            ;Зайняти комутатор мережі 5G
        DEPART     4                                ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 4
        ADVANCE    10, FN$EXPON                    ;Час ослугування запитів пріоритету 4
        RELEASE    P_GW                            ;Звільнити комутатор мережі 5G
        TERMINATE                                     ;Запит обслуговуваний
VIDM4 TERMINATE                                     ;Відмова в обслуговуванні запиту
пріоритету 4
QFI5  GENERATE    100, FN$EXPON, , , 5            ;Поток запитів пріоритету 5
        TEST L Q5, 6, VIDM5                       ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
        QUEUE      5                                ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів пріоритету 5
        SEIZE      P_GW                            ;Зайняти комутатор мережі 5G
        DEPART     5                                ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 5
        ADVANCE    11, FN$EXPON                    ;Час ослугування запитів пріоритету 5
        RELEASE    P_GW                            ;Звільнити комутатор мережі 5G
        TERMINATE                                     ;Запит обслуговуваний
VIDM5 TERMINATE                                     ;Відмова в обслуговуванні запиту
пріоритету 5
QFI6  GENERATE    100, FN$EXPON, , , 4            ;Поток запитів пріоритету 6
        TEST L Q6, 10, VIDM6                      ;Зайняти комутатор мережі 5G
        QUEUE      6                                ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів пріоритету 6
        SEIZE      P_GW                            ;Зайняти комутатор мережі 5G
        DEPART     6                                ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 6
        ADVANCE    5, FN$EXPON                    ;Час ослугування запитів пріоритету 6
        RELEASE    P_GW                            ;Звільнити комутатор мережі 5G
        TERMINATE                                     ;Запит обслуговуваний
VIDM6 TERMINATE                                     ;Відмова в обслуговуванні запиту
пріоритету 6
QFI7  GENERATE    100, FN$EXPON, , , 3            ;Поток запитів пріоритету 7
        TEST L Q7, 9, VIDM7                      ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
        QUEUE      7                                ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів пріоритету 7
        SEIZE      P_GW                            ;Зайняти комутатор мережі 5G
        DEPART     7                                ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 7
        ADVANCE    5, FN$EXPON                    ;Час ослугування запитів пріоритету 7
        RELEASE    P_GW                            ;Звільнити комутатор мережі 5G
        TERMINATE                                     ;Запит обслуговуваний
VIDM7 TERMINATE                                     ;Відмова в обслуговуванні запиту
пріоритету 7
QFI8  GENERATE    100, FN$EXPON, , , 2            ;Поток запитів пріоритету 8
        TEST L Q8, 10, VIDM8                    ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі

```

```

        QUEUE      8                ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів пріоритету 8
        SEIZE      P_GW             ;Зайняти комутатор мережі 5G
        DEPART     8                ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів пріоритету 8
        ADVANCE    5, FN$EXPON      ;Час ослугування запитів пріоритету 8
        RELEASE    P_GW             ;Звільнити комутатор мережі 5G
        TERMINATE  ;Запит обслуговуваний
VIDM8 TERMINATE                    ;Відмова в обслуговуванні запиту
пріоритету 8
QFI9_L1 GENERATE  100, FN$EXPON, , , 1 ;Поток запитів від IoT класу L1
        TEST L Q9, 10, VIDM_L1     ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
        QUEUE      9                ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів від IoT класу L1
        SEIZE      P_GW             ;Зайняти комутатор мережі 5G
        DEPART     9                ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів від IoT класу L1
        ADVANCE    1, FN$EXPON      ;Час ослугування запитів від IoT класу
L1
        RELEASE    P_GW             ;Звільнити комутатор мережі 5G
        TERMINATE  ;Запит від IoT класу L1 обслуговуваний
QFI9_L2 GENERATE  100, FN$EXPON, , , 1 ;Поток запитів від IoT класу L2
        TEST L Q10, 10, VIDM_L2    ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
        QUEUE      10               ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів від IoT класу L2
        SEIZE      P_GW             ;Зайняти комутатор мережі 5G
        DEPART     10              ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів від IoT класу L2
        ADVANCE    1, FN$EXPON      ;Час ослугування запитів від IoT класу
L2
        RELEASE    P_GW             ;Звільнити комутатор мережі 5G
        TERMINATE  ;Запит від IoT класу L2 обслуговуваний
QFI9_L3 GENERATE  100, FN$EXPON, , , 1 ;Поток запитів від IoT класу L3
        TEST L Q11, 10, VIDM_L3    ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
        QUEUE      11               ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів від IoT класу L3
        SEIZE      P_GW             ;Зайняти комутатор мережі 5G
        DEPART     11              ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів від IoT класу L3
        ADVANCE    1, FN$EXPON      ;Час ослугування запитів від IoT класу
L3
        RELEASE    P_GW             ;Звільнити комутатор мережі 5G
        TERMINATE  ;Запит від IoT класу L3 обслуговуваний
QFI9_L4 GENERATE  100, FN$EXPON, , , 1 ;Поток запитів від IoT класу L4
        TEST L Q12, 10, VIDM_L4    ;Перевірка на перевищення часу затримки
в черзі
        QUEUE      12               ;Стати в чергу на обслуговування для
запитів від IoT класу L4
        SEIZE      P_GW             ;Зайняти комутатор мережі 5G
        DEPART     12              ;Вийти з черзі на обслуговування для
запитів від IoT класу L4
        ADVANCE    1, FN$EXPON      ;Час ослугування запитів від IoT класу
L4
        RELEASE    P_GW             ;Звільнити комутатор мережі 5G
        TERMINATE  ;Запит від IoT класу L4 обслуговуваний
*
*****
***** КЛАСИФІКАТОР *****
*****
*
VIDM_L1 PRIORITY  9                ;Надати найвищий пріоритет запиту від

```

```

IoT класу L1 до 9
    SPLIT 1,ENTER_9 ;Почати обслуговування запиту від IoT з
пріоритетом 9
    TERMINATE ;Закінчити обслуговування запиту від IoT
класу L1
VIDM_L2 PRIORITY 8 ;Підвищити пріоритет запиту від IoT
класу L2 до 8
    SPLIT 1,ENTER_8 ;Почати обслуговування запиту від IoT
пріоритету 8
    TERMINATE ;Закінчити обслуговування запиту від IoT
класу L2
VIDM_L3 PRIORITY 7 ;Підвищити пріоритет запиту від IoT
класу L3 до 7
    SPLIT 1,ENTER_7 ;Почати обслуговування запиту від IoT
пріоритету 7
    TERMINATE ;Закінчити обслуговування запиту від IoT
класу L3
VIDM_L4 PRIORITY 1 ;Зберігти пріоритет 1 для запиту від IoT
класу L4
    TERMINATE ;Закінчити обслуговування запиту від IoT
класу L4
*
TIME GENERATE 3600000 ;Одиниця моделювання: мс
    TERMINATE 1 ;Закінчити через 1 годину

```

ДОДАТОК Л

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗАПИТІВ ВІД ІОТ-
ПРИСТРОЇВ В МЕРЕЖІ 5G

GPSS World Simulation Report - 5G+Алгоритм.81.1

Saturday, May 06, 2023 12:49:05

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	257459.017	117	1	0

NAME	VALUE
ENTER_7	20.000
ENTER_8	11.000
ENTER_9	2.000
EXPON	10012.000
P_GW	10013.000
QFI1	1.000
QFI2	10.000
QFI3	19.000
QFI4	28.000
QFI5	37.000
QFI6	46.000
QFI7	55.000
QFI8	64.000
QFI9_L1	73.000
QFI9_L2	81.000
QFI9_L3	89.000
QFI9_L4	97.000
TIME	116.000
VIDM1	9.000
VIDM2	18.000
VIDM3	27.000
VIDM4	36.000
VIDM5	45.000
VIDM6	54.000
VIDM7	63.000
VIDM8	72.000
VIDM_L1	105.000
VIDM_L2	108.000
VIDM_L3	111.000
VIDM_L4	114.000
WAIT_L1	10008.000
WAIT_L2	10009.000
WAIT_L3	10010.000
WAIT_L4	10011.000
WAIT_PR1	10000.000
WAIT_PR2	10001.000
WAIT_PR3	10002.000
WAIT_PR4	10003.000
WAIT_PR5	10004.000
WAIT_PR6	10005.000
WAIT_PR7	10006.000
WAIT_PR8	10007.000

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT	COUNT	RETRY
QFI1	1	GENERATE	2463	0	0	
ENTER_9	2	TEST	2464	0	0	
	3	QUEUE	2316	0	0	
	4	SEIZE	2316	0	0	
	5	DEPART	2316	0	0	
	6	ADVANCE	2316	1	0	
	7	RELEASE	2315	0	0	
	8	TERMINATE	2315	0	0	
VIDM1	9	TERMINATE	148	0	0	
QFI2	10	GENERATE	2590	0	0	
ENTER_8	11	TEST	2593	0	0	

	12	QUEUE	2591	0	0
	13	SEIZE	2591	0	0
	14	DEPART	2591	0	0
	15	ADVANCE	2591	0	0
	16	RELEASE	2591	0	0
	17	TERMINATE	2591	0	0
VIDM2	18	TERMINATE	2	0	0
QFI3	19	GENERATE	2645	0	0
ENTER_7	20	TEST	2645	0	0
	21	QUEUE	2639	0	0
	22	SEIZE	2639	0	0
	23	DEPART	2639	0	0
	24	ADVANCE	2639	0	0
	25	RELEASE	2639	0	0
	26	TERMINATE	2639	0	0
VIDM3	27	TERMINATE	6	0	0
QFI4	28	GENERATE	2571	0	0
	29	TEST	2571	0	0
	30	QUEUE	2570	5	0
	31	SEIZE	2565	0	0
	32	DEPART	2565	0	0
	33	ADVANCE	2565	0	0
	34	RELEASE	2565	0	0
	35	TERMINATE	2565	0	0
VIDM4	36	TERMINATE	1	0	0
QFI5	37	GENERATE	2575	0	0
	38	TEST	2575	0	0
	39	QUEUE	2573	0	0
	40	SEIZE	2573	0	0
	41	DEPART	2573	0	0
	42	ADVANCE	2573	0	0
	43	RELEASE	2573	0	0
	44	TERMINATE	2573	0	0
VIDM5	45	TERMINATE	2	0	0
QFI6	46	GENERATE	2637	0	0
	47	TEST	2637	0	0
	48	QUEUE	2637	2	0
	49	SEIZE	2635	0	0
	50	DEPART	2635	0	0
	51	ADVANCE	2635	0	0
	52	RELEASE	2635	0	0
	53	TERMINATE	2635	0	0
VIDM6	54	TERMINATE	0	0	0
QFI7	55	GENERATE	2500	0	0
	56	TEST	2500	0	0
	57	QUEUE	2500	0	0
	58	SEIZE	2500	0	0
	59	DEPART	2500	0	0
	60	ADVANCE	2500	0	0
	61	RELEASE	2500	0	0
	62	TERMINATE	2500	0	0
VIDM7	63	TERMINATE	0	0	0
QFI8	64	GENERATE	2633	0	0
	65	TEST	2633	0	0
	66	QUEUE	2633	0	0
	67	SEIZE	2633	0	0
	68	DEPART	2633	0	0
	69	ADVANCE	2633	0	0
	70	RELEASE	2633	0	0
	71	TERMINATE	2633	0	0
VIDM8	72	TERMINATE	0	0	0
QFI9_L1	73	GENERATE	2641	0	0
	74	TEST	2641	0	0
	75	QUEUE	2640	0	0
	76	SEIZE	2640	0	0
	77	DEPART	2640	0	0
	78	ADVANCE	2640	0	0
	79	RELEASE	2640	0	0
	80	TERMINATE	2640	0	0
QFI9_L2	81	GENERATE	2549	0	0
	82	TEST	2549	0	0

	83	QUEUE	2546	2	0
	84	SEIZE	2544	0	0
	85	DEPART	2544	0	0
	86	ADVANCE	2544	0	0
	87	RELEASE	2544	0	0
	88	TERMINATE	2544	0	0
QFI9_L3	89	GENERATE	2639	0	0
	90	TEST	2639	0	0
	91	QUEUE	2639	1	0
	92	SEIZE	2638	0	0
	93	DEPART	2638	0	0
	94	ADVANCE	2638	0	0
	95	RELEASE	2638	0	0
	96	TERMINATE	2638	0	0
QFI9_L4	97	GENERATE	2619	0	0
	98	TEST	2619	0	0
	99	QUEUE	2614	2	0
	100	SEIZE	2612	0	0
	101	DEPART	2612	0	0
	102	ADVANCE	2612	0	0
	103	RELEASE	2612	0	0
	104	TERMINATE	2612	0	0
VIDM_L1	105	PRIORITY	1	0	0
	106	SPLIT	1	0	0
	107	TERMINATE	1	0	0
VIDM_L2	108	PRIORITY	3	0	0
	109	SPLIT	3	0	0
	110	TERMINATE	3	0	0
VIDM_L3	111	PRIORITY	0	0	0
	112	SPLIT	0	0	0
	113	TERMINATE	0	0	0
VIDM_L4	114	PRIORITY	5	0	0
	115	TERMINATE	5	0	0
TIME	116	GENERATE	0	0	0
	117	TERMINATE	0	0	0

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
P_GW	30886	0.692	5.768	1	31066	0	0	0	12

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY (0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-)	RETRY
1	1	0	2316	769	0.052	5.754	8.615	0
2	3	0	2591	777	0.081	8.084	11.547	0
3	3	0	2639	766	0.106	10.348	14.580	0
4	5	5	2570	770	0.129	12.894	18.410	0
5	6	0	2573	781	0.205	20.520	29.463	0
6	8	2	2637	788	0.268	26.177	37.333	0
7	9	0	2500	786	0.328	33.787	49.281	0
8	9	0	2633	799	0.425	41.597	59.720	0
9	10	0	2640	848	0.513	50.014	73.682	0
10	10	2	2546	790	0.498	50.407	73.084	0
11	8	1	2639	800	0.505	49.251	70.676	0
12	10	2	2614	776	0.549	54.108	76.952	0

TABLE	MEAN	STD.DEV.	RANGE	RETRY	FREQUENCY	CUM.%
WAIT_PR1	5.754	8.847		0		
			-	10.000	1848	79.79
			10.000	-	20.000	310 93.18
			20.000	-	30.000	95 97.28
			30.000	-	40.000	41 99.05
			40.000	-	50.000	12 99.57
			50.000	-	60.000	3 99.70
			60.000	-	70.000	6 99.96
			70.000	-	80.000	0 99.96
			80.000	-	90.000	1 100.00
WAIT_PR2	8.084	12.822		0		
			-	10.000	1905	73.52
			10.000	-	20.000	380 88.19
			20.000	-	30.000	133 93.32

			30.000	-	40.000	71	96.06
			40.000	-	50.000	59	98.34
			50.000	-	60.000	19	99.07
			60.000	-	70.000	9	99.42
			70.000	-	80.000	7	99.69
			80.000	-	90.000	4	99.85
			90.000	-	100.000	3	99.96
			100.000	-	110.000	0	99.96
			110.000	-	120.000	0	99.96
			120.000	-	130.000	1	100.00
WAIT_PR3	10.348	17.467				0	
				-	10.000	1854	70.25
			10.000	-	20.000	323	82.49
			20.000	-	30.000	205	90.26
			30.000	-	40.000	98	93.97
			40.000	-	50.000	54	96.02
			50.000	-	60.000	39	97.50
			60.000	-	70.000	22	98.33
			70.000	-	80.000	15	98.90
			80.000	-	90.000	6	99.13
			90.000	-	100.000	9	99.47
			100.000	-	110.000	4	99.62
			110.000	-	120.000	2	99.70
			120.000	-	130.000	4	99.85
			130.000	-	140.000	2	99.92
			140.000	-		2	100.00
WAIT_PR4	12.788	21.458		-		0	
				-	10.000	1679	65.46
			10.000	-	20.000	348	79.03
			20.000	-	30.000	190	86.43
			30.000	-	40.000	115	90.92
			40.000	-	50.000	75	93.84
			50.000	-	60.000	49	95.75
			60.000	-	70.000	37	97.19
			70.000	-	80.000	18	97.89
			80.000	-	90.000	16	98.52
			90.000	-	100.000	8	98.83
			100.000	-	110.000	11	99.26
			110.000	-	120.000	5	99.45
			120.000	-	130.000	3	99.57
			130.000	-	140.000	2	99.65
			140.000	-	150.000	3	99.77
			150.000	-	160.000	3	99.88
			160.000	-	170.000	0	99.88
			170.000	-	180.000	1	99.92
			180.000	-	190.000	1	99.96
			190.000	-	200.000	0	99.96
			200.000	-	210.000	0	99.96
			210.000	-		1	100.00
WAIT_PR5	20.520	40.513		-		0	
				-	10.000	1573	61.13
			10.000	-	20.000	287	72.29
			20.000	-	30.000	176	79.13
			30.000	-	40.000	123	83.91
			40.000	-	50.000	90	87.41
			50.000	-	60.000	75	90.32
			60.000	-	70.000	45	92.07
			70.000	-	80.000	44	93.78
			80.000	-	90.000	32	95.03
			90.000	-	100.000	24	95.96
			100.000	-	110.000	22	96.81
			110.000	-	120.000	15	97.40
			120.000	-	130.000	10	97.78
			130.000	-	140.000	6	98.02
			140.000	-	150.000	2	98.10
			150.000	-	160.000	8	98.41
			160.000	-	170.000	6	98.64
			170.000	-	180.000	3	98.76
			180.000	-	190.000	3	98.87
			190.000	-	200.000	7	99.14
			200.000	-	210.000	2	99.22

			210.000	-	220.000		1	99.26
			220.000	-	230.000		1	99.30
			230.000	-	240.000		3	99.42
			240.000	-	250.000		0	99.42
			250.000	-	260.000		0	99.42
			260.000	-	270.000		1	99.46
			270.000	-			14	100.00
WAIT_PR6	26.101	49.244		-		0		
				-	10.000		1474	55.94
			10.000	-	20.000		311	67.74
			20.000	-	30.000		184	74.72
			30.000	-	40.000		119	79.24
			40.000	-	50.000		113	83.53
			50.000	-	60.000		82	86.64
			60.000	-	70.000		68	89.22
			70.000	-	80.000		40	90.74
			80.000	-	90.000		48	92.56
			90.000	-	100.000		27	93.59
			100.000	-	110.000		26	94.57
			110.000	-	120.000		21	95.37
			120.000	-	130.000		12	95.83
			130.000	-	140.000		17	96.47
			140.000	-	150.000		13	96.96
			150.000	-	160.000		10	97.34
			160.000	-	170.000		4	97.50
			170.000	-	180.000		3	97.61
			180.000	-	190.000		9	97.95
			190.000	-	200.000		6	98.18
			200.000	-	210.000		12	98.63
			210.000	-	220.000		7	98.90
			220.000	-	230.000		3	99.01
			230.000	-	240.000		2	99.09
			240.000	-	250.000		1	99.13
			250.000	-	260.000		2	99.20
			260.000	-	270.000		2	99.28
			270.000	-	280.000		2	99.35
			280.000	-	290.000		2	99.43
			290.000	-	300.000		2	99.51
			300.000	-	310.000		3	99.62
			310.000	-	320.000		0	99.62
			320.000	-	330.000		0	99.62
			330.000	-	340.000		1	99.66
			340.000	-	350.000		0	99.66
			350.000	-			9	100.00
WAIT_PR7	33.787	64.061		-		0		
				-	10.000		1385	55.40
			10.000	-	20.000		243	65.12
			20.000	-	30.000		151	71.16
			30.000	-	40.000		104	75.32
			40.000	-	50.000		84	78.68
			50.000	-	60.000		68	81.40
			60.000	-	70.000		61	83.84
			70.000	-	80.000		54	86.00
			80.000	-	90.000		47	87.88
			90.000	-	100.000		39	89.44
			100.000	-	110.000		25	90.44
			110.000	-	120.000		34	91.80
			120.000	-	130.000		20	92.60
			130.000	-	140.000		22	93.48
			140.000	-	150.000		20	94.28
			150.000	-	160.000		27	95.36
			160.000	-	170.000		10	95.76
			170.000	-	180.000		17	96.44
			180.000	-	190.000		9	96.80
			190.000	-	200.000		14	97.36
			200.000	-	210.000		6	97.60
			210.000	-	220.000		7	97.88
			220.000	-	230.000		6	98.12
			230.000	-	240.000		8	98.44
			240.000	-	250.000		5	98.64
			250.000	-	260.000		3	98.76

				260.000	-	270.000		4	98.92
				270.000	-	280.000		3	99.04
				280.000	-	290.000		3	99.16
				290.000	-	300.000		1	99.20
				300.000	-	310.000		1	99.24
				310.000	-	320.000		2	99.32
				320.000	-	330.000		1	99.36
				330.000	-	340.000		0	99.36
				340.000	-	350.000		0	99.36
				350.000	-	360.000		1	99.40
				360.000	-	370.000		0	99.40
				370.000	-	380.000		0	99.40
				380.000	-	390.000		2	99.48
				390.000	-	400.000		1	99.52
				400.000	-	410.000		1	99.56
				410.000	-			11	100.00
WAIT_PR8	41.597	78.098			-			0	
					-	10.000		1362	51.73
				10.000	-	20.000		233	60.58
				20.000	-	30.000		168	66.96
				30.000	-	40.000		134	72.05
				40.000	-	50.000		93	75.58
				50.000	-	60.000		85	78.81
				60.000	-	70.000		73	81.58
				70.000	-	80.000		57	83.74
				80.000	-	90.000		53	85.76
				90.000	-	100.000		46	87.50
				100.000	-	110.000		28	88.57
				110.000	-	120.000		35	89.90
				120.000	-	130.000		30	91.04
				130.000	-	140.000		23	91.91
				140.000	-	150.000		15	92.48
				150.000	-	160.000		20	93.24
				160.000	-	170.000		15	93.81
				170.000	-	180.000		13	94.30
				180.000	-	190.000		8	94.61
				190.000	-	200.000		14	95.14
				200.000	-	210.000		7	95.40
				210.000	-	220.000		12	95.86
				220.000	-	230.000		7	96.13
				230.000	-	240.000		10	96.51
				240.000	-	250.000		7	96.77
				250.000	-	260.000		5	96.96
				260.000	-	270.000		7	97.23
				270.000	-	280.000		8	97.53
				280.000	-	290.000		7	97.80
				290.000	-	300.000		10	98.18
				300.000	-	310.000		6	98.40
				310.000	-	320.000		2	98.48
				320.000	-	330.000		3	98.59
				330.000	-	340.000		2	98.67
				340.000	-	350.000		1	98.71
				350.000	-	360.000		4	98.86
				360.000	-	370.000		2	98.94
				370.000	-	380.000		2	99.01
				380.000	-	390.000		4	99.16
				390.000	-	400.000		0	99.16
				400.000	-	410.000		3	99.28
				410.000	-	420.000		1	99.32
				420.000	-	430.000		3	99.43
				430.000	-	440.000		1	99.47
				440.000	-	450.000		0	99.47
				450.000	-	460.000		1	99.51
				460.000	-	470.000		0	99.51
				470.000	-			13	100.00
WAIT_L1	50.014	92.646			-			0	
					-	10.000		1305	49.43
				10.000	-	20.000		203	57.12
				20.000	-	30.000		177	63.83
				30.000	-	40.000		137	69.02
				40.000	-	50.000		106	73.03

50.000	-	60.000	76	75.91
60.000	-	70.000	69	78.52
70.000	-	80.000	64	80.95
80.000	-	90.000	56	83.07
90.000	-	100.000	41	84.62
100.000	-	110.000	39	86.10
110.000	-	120.000	39	87.58
120.000	-	130.000	30	88.71
130.000	-	140.000	21	89.51
140.000	-	150.000	18	90.19
150.000	-	160.000	21	90.98
160.000	-	170.000	24	91.89
170.000	-	180.000	14	92.42
180.000	-	190.000	18	93.11
190.000	-	200.000	9	93.45
200.000	-	210.000	10	93.83
210.000	-	220.000	10	94.20
220.000	-	230.000	6	94.43
230.000	-	240.000	10	94.81
240.000	-	250.000	8	95.11
250.000	-	260.000	10	95.49
260.000	-	270.000	8	95.80
270.000	-	280.000	4	95.95
280.000	-	290.000	6	96.17
290.000	-	300.000	6	96.40
300.000	-	310.000	9	96.74
310.000	-	320.000	8	97.05
320.000	-	330.000	7	97.31
330.000	-	340.000	5	97.50
340.000	-	350.000	5	97.69
350.000	-	360.000	6	97.92
360.000	-	370.000	4	98.07
370.000	-	380.000	2	98.14
380.000	-	390.000	3	98.26
390.000	-	400.000	2	98.33
400.000	-	410.000	0	98.33
410.000	-	420.000	7	98.60
420.000	-	430.000	3	98.71
430.000	-	440.000	1	98.75
440.000	-	450.000	1	98.79
450.000	-	460.000	0	98.79
460.000	-	470.000	1	98.83
470.000	-	480.000	4	98.98
480.000	-	490.000	6	99.20
490.000	-	500.000	1	99.24
500.000	-	510.000	2	99.32
510.000	-	520.000	2	99.39
520.000	-	530.000	1	99.43
530.000	-	-	15	100.00
WAIT_L2	50.394	93.260	0	
	-	10.000	1240	48.74
10.000	-	20.000	245	58.37
20.000	-	30.000	157	64.54
30.000	-	40.000	122	69.34
40.000	-	50.000	89	72.84
50.000	-	60.000	71	75.63
60.000	-	70.000	54	77.75
70.000	-	80.000	62	80.19
80.000	-	90.000	56	82.39
90.000	-	100.000	49	84.32
100.000	-	110.000	28	85.42
110.000	-	120.000	26	86.44
120.000	-	130.000	24	87.38
130.000	-	140.000	32	88.64
140.000	-	150.000	31	89.86
150.000	-	160.000	19	90.61
160.000	-	170.000	24	91.55
170.000	-	180.000	16	92.18
180.000	-	190.000	16	92.81
190.000	-	200.000	18	93.51
200.000	-	210.000	13	94.03

210.000	-	220.000	10	94.42
220.000	-	230.000	16	95.05
230.000	-	240.000	7	95.32
240.000	-	250.000	8	95.64
250.000	-	260.000	9	95.99
260.000	-	270.000	7	96.27
270.000	-	280.000	8	96.58
280.000	-	290.000	5	96.78
290.000	-	300.000	3	96.89
300.000	-	310.000	4	97.05
310.000	-	320.000	9	97.41
320.000	-	330.000	1	97.44
330.000	-	340.000	5	97.64
340.000	-	350.000	2	97.72
350.000	-	360.000	5	97.92
360.000	-	370.000	2	98.00
370.000	-	380.000	4	98.15
380.000	-	390.000	0	98.15
390.000	-	400.000	6	98.39
400.000	-	410.000	1	98.43
410.000	-	420.000	2	98.51
420.000	-	430.000	5	98.70
430.000	-	440.000	0	98.70
440.000	-	450.000	1	98.74
450.000	-	460.000	1	98.78
460.000	-	470.000	2	98.86
470.000	-	480.000	0	98.86
480.000	-	490.000	2	98.94
490.000	-	500.000	5	99.14
500.000	-	510.000	2	99.21
510.000	-	520.000	2	99.29
520.000	-	530.000	2	99.37
530.000	-	540.000	3	99.49
540.000	-	550.000	2	99.57
550.000	-	-	11	100.00
WAIT_L3	49.213	89.749	0	
		10.000	1280	48.52
10.000	-	20.000	232	57.32
20.000	-	30.000	191	64.56
30.000	-	40.000	122	69.18
40.000	-	50.000	97	72.86
50.000	-	60.000	70	75.51
60.000	-	70.000	65	77.98
70.000	-	80.000	64	80.40
80.000	-	90.000	59	82.64
90.000	-	100.000	48	84.46
100.000	-	110.000	44	86.13
110.000	-	120.000	39	87.60
120.000	-	130.000	26	88.59
130.000	-	140.000	23	89.46
140.000	-	150.000	24	90.37
150.000	-	160.000	27	91.39
160.000	-	170.000	24	92.30
170.000	-	180.000	10	92.68
180.000	-	190.000	10	93.06
190.000	-	200.000	13	93.56
200.000	-	210.000	14	94.09
210.000	-	220.000	15	94.66
220.000	-	230.000	11	95.07
230.000	-	240.000	7	95.34
240.000	-	250.000	10	95.72
250.000	-	260.000	9	96.06
260.000	-	270.000	13	96.55
270.000	-	280.000	3	96.66
280.000	-	290.000	11	97.08
290.000	-	300.000	1	97.12
300.000	-	310.000	3	97.23
310.000	-	320.000	10	97.61
320.000	-	330.000	5	97.80
330.000	-	340.000	2	97.88
340.000	-	350.000	1	97.92

			350.000	-	360.000		1	97.95
			360.000	-	370.000		3	98.07
			370.000	-	380.000		4	98.22
			380.000	-	390.000		1	98.26
			390.000	-	400.000		3	98.37
			400.000	-	410.000		3	98.48
			410.000	-	420.000		1	98.52
			420.000	-	430.000		0	98.52
			430.000	-	440.000		3	98.64
			440.000	-	450.000		1	98.67
			450.000	-	460.000		3	98.79
			460.000	-	470.000		3	98.90
			470.000	-	480.000		0	98.90
			480.000	-	490.000		3	99.01
			490.000	-	500.000		5	99.20
			500.000	-			21	100.00
WAIT_L4		54.080	95.632	-		0		
				-	10.000		1230	47.09
			10.000	-	20.000		215	55.32
			20.000	-	30.000		157	61.33
			30.000	-	40.000		131	66.35
			40.000	-	50.000		102	70.25
			50.000	-	60.000		85	73.51
			60.000	-	70.000		66	76.03
			70.000	-	80.000		79	79.06
			80.000	-	90.000		57	81.24
			90.000	-	100.000		46	83.00
			100.000	-	110.000		46	84.76
			110.000	-	120.000		37	86.18
			120.000	-	130.000		23	87.06
			130.000	-	140.000		17	87.71
			140.000	-	150.000		31	88.90
			150.000	-	160.000		24	89.82
			160.000	-	170.000		26	90.81
			170.000	-	180.000		18	91.50
			180.000	-	190.000		19	92.23
			190.000	-	200.000		14	92.76
			200.000	-	210.000		8	93.07
			210.000	-	220.000		12	93.53
			220.000	-	230.000		16	94.14
			230.000	-	240.000		13	94.64
			240.000	-	250.000		12	95.10
			250.000	-	260.000		8	95.41
			260.000	-	270.000		12	95.87
			270.000	-	280.000		4	96.02
			280.000	-	290.000		8	96.32
			290.000	-	300.000		5	96.52
			300.000	-	310.000		13	97.01
			310.000	-	320.000		5	97.21
			320.000	-	330.000		6	97.43
			330.000	-	340.000		4	97.59
			340.000	-	350.000		4	97.74
			350.000	-	360.000		3	97.86
			360.000	-	370.000		3	97.97
			370.000	-	380.000		3	98.09
			380.000	-	390.000		1	98.12
			390.000	-	400.000		3	98.24
			400.000	-	410.000		2	98.32
			410.000	-	420.000		1	98.35
			420.000	-	430.000		4	98.51
			430.000	-	440.000		2	98.58
			440.000	-	450.000		1	98.62
			450.000	-	460.000		1	98.66
			460.000	-	470.000		4	98.81
			470.000	-	480.000		1	98.85
			480.000	-			30	100.00

FEC XN	PRI	BDT	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
31071	4	257462.635	31071	0	46		
31079	6	257468.308	31079	0	28		

31047	7	257473.401	31047	0	19
31054	5	257477.422	31054	0	37
31066	9	257477.786	31066	6	7
31076	9	257484.292	31076	0	1
31059	2	257492.387	31059	0	64
31067	8	257538.018	31067	0	10
31077	1	257567.706	31077	0	81
31044	1	257589.543	31044	0	73
31056	3	257619.291	31056	0	55
31075	1	257633.732	31075	0	97
31063	1	257752.488	31063	0	89
13	0	3600000.000	13	0	116