

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Факультет «Інформаційно-керуючі системи та технології»

Кафедра «Транспортний зв'язок»

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи магістра

на тему:

**РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ
LTE - M**

МРА 02.24.214.06.ПЗ

Виконав:

студент групи 214-КМТ-Д23
спеціальності 273 «Залізничний транспорт»
Освітньої програми «Комп'ютерні
мережеві технології» (роботу
виконано самостійно відповідно до
принципів академічної доброчесності)



Дмитро САПЕГІН

Керівник:

доцент кафедри, канд. техн. наук



Сергій ІНДИК

Рецензент:

доцент кафедри АТ, канд. техн. наук, доцент

Сергій ЗМІЙ

Харків – 2025 р.

АНОТАЦІЯ

Актуальність роботи. З розвитком технологій мобільного зв'язку та Інтернету речей, зростає потреба в енергоефективних та високопродуктивних мережах для підключення великої кількості пристроїв. LTE-M є однією з найбільш перспективних технологій для реалізації інтелектуальних мереж, забезпечуючи низьке споживання енергії, високу надійність і масштабованість. Це робить LTE-M ідеальним рішенням для масового підключення сенсорів, пристроїв та інших елементів IoT. Проектування інтелектуальних мереж на основі цієї технології є актуальним, оскільки дозволяє інтегрувати різноманітні пристрої в єдину екосистему, забезпечуючи ефективну передачу даних у реальному часі.

Ключові слова: ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕРЕЖІ, LTE-M, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, ШИРОКОСМУГОВИЙ ДОСТУП, СЕНСОРНІ ПРИСТРОЇ, МОНІТОРИНГ, ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ, БЕЗПРОВІДНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ПЕРЕДАЧА ДАНИХ.

Об'єктом дослідження є інтелектуальна мережа на основі технології LTE-M, яка забезпечує підключення та ефективну взаємодію пристроїв в екосистемі Інтернету речей.

Мета роботи є розробка моделі інтелектуальної мережі, що використовує технологію LTE-M для підтримки високопродуктивних і енергоефективних пристроїв у рамках IoT.

Структура та обсяг роботи. Об'єм даної роботи становить 57 сторінок друкованого тексту, містить 16 рисунків, 4 таблиці, 27 літературних джерел. Робота містить вступ, 4 розділи, висновки та список використаних джерел.

У першому розділі приведено аналіз розвитку технології стільникового зв'язку, особливості п'ятого покоління мережі та технології стільникового IoT.

У другому розділі описано розвиток IoT за рахунок стільникових технологій, зокрема стандартизацію 3GPP, а також сценарії зв'язку для стільникового IoT та порівняння різних технологій LPWA.



Третій розділ включає в себе розгляд особливостей технології LTE-M, зокрема її фізичний рівень, основні характеристики та переваги порівняно з іншими технологіями стільникового IoT. Проведено аналіз можливостей LTE-M для забезпечення ефективної та енергоефективної комунікації пристроїв.

Четвертий розділ присвячено розробці та моделюванню інтелектуальної мережі на основі LTE-M. У розділі детально описано програмну реалізацію моделі, налаштування мережевого обладнання та оцінку енергоефективності мережі при збільшенні кількості підключених пристроїв.

Методи дослідження включають теоретичний аналіз існуючих технологій мобільного зв'язку та їх застосування в Інтернеті речей, моделювання інтелектуальних мереж на основі LTE-M, зокрема фізичного рівня мережі та енергоефективності та Аналіз продуктивності мережі.

Рекомендації щодо використання та результати впровадження. Результати роботи можуть бути використані для проєктування та впровадження інтелектуальних мереж у корпоративних системах для забезпечення з'єднання великої кількості IoT-пристроїв. Це дозволить знизити витрати на енергоспоживання та покращити ефективність передачі даних, а також оптимізувати використання технології LTE-M у різних галузях.



OVERVIEW

Relevance of the work. With the development of mobile communication technologies and the Internet of Things (IoT), the need for energy-efficient and high-performance networks to connect a large number of devices is growing. LTE-M is one of the most promising technologies for implementing intelligent networks, offering low energy consumption, high reliability, and scalability. This makes LTE-M an ideal solution for mass connectivity of sensors, devices, and other IoT elements. The design of intelligent networks based on this technology is relevant, as it allows the integration of various devices into a unified ecosystem, ensuring effective real-time data transmission.

Keywords: INTELLIGENT NETWORKS, LTE-M, INTERNET OF THINGS, BROADBAND ACCESS, SENSOR DEVICES, MONITORING, PERFORMANCE OPTIMIZATION, WIRELESS TECHNOLOGIES, ENERGY EFFICIENCY, DATA TRANSMISSION.

The object of research is an intelligent network based on LTE-M technology, which ensures the connection and effective interaction of devices within the Internet of Things ecosystem.

The purpose of the research is to develop a model of an intelligent network using LTE-M technology to support high-performance and energy-efficient devices within the IoT framework.

Structure and scope of the paper. This work consists of 57 pages of printed text. It contains of 16 figures, 4 tables, 27 literature sources. The work includes an introduction, 4 chapters, conclusions, and a list of used sources.

The first chapter provides an analysis of the development of mobile communication technology, the features of fifth-generation networks, and cellular IoT technology.

The second chapter describes the development of IoT through cellular technologies, including the 3GPP standardization, communication scenarios for cellular IoT, and a comparison of various LPWA technologies.



The third chapter includes an overview of the LTE-M technology, specifically its physical layer, main characteristics, and advantages compared to other cellular IoT technologies. The chapter also analyzes LTE-M's capabilities for providing efficient and energy-efficient device communication.

Chapter four is dedicated to the development and modeling of an intelligent network based on LTE-M. This chapter details the software implementation of the model, network equipment configuration, and energy efficiency evaluation of the network when the number of connected devices increases.

Research methods. The research methods include theoretical analysis of existing mobile communication technologies and their application in the Internet of Things, modeling of intelligent networks based on LTE-M, especially the physical layer of the network and energy efficiency, and performance analysis of the network.

Recommendations for use and implementation results. The results of the work can be used for designing and implementing intelligent networks in corporate systems to ensure the connection of a large number of IoT devices. This will help reduce energy consumption, improve data transmission efficiency, and optimize the use of LTE-M technology in various sectors.



ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	9
Вступ	10
1 Системи мобільного зв'язку наступного покоління	1
1.1 Історія розвитку технології стільникового зв'язку	1
1.1.1 Друге покоління (2G)	14
1.1.2 Третє покоління (3G)	16
1.1.3 Четверте покоління (4G)	17
1.2 Системи зв'язку п'ятого покоління 5G	20
1.2.1 Неавтономна архітектура покоління 5G	23
1.2.2 Автономна архітектура покоління 5G	24
1.2.3 Технології стільникового IoT	25
2. Розвиток IoT за рахунок стільникових технологій	29
2.1 Стандартизація 3GPP	29
2.2 Сценарії зв'язку для стільникового IoT	30
2.3 Порівняння технологій LPWA	32
3 LTE для пристроїв (LTE-M)	34
3.1 Огляд технології	34
3.2 Фізичний рівень	37
4 Розробка моделі інтелектуальної мережі на основі технології LTE-M	43
4.1 Програмна реалізація моделі інтелектуальної мережі на основі технології LTE-M	43
4.2 Моделювання інтелектуальної мережі на основі технології LTE-M	48
4.2.1 Аналіз продуктивності мережі	
4.2.2 Оцінка енергоефективності	
Висновки	56
Список використаних джерел	57



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ETSI. GSM Specifications. European Telecommunications Standards Institute, 1991. – 120 p.
2. 3GPP. 3GPP Releases Overview. Third Generation Partnership Project, 2022. – 350 p.
3. ITU. International Telecommunications Union Reports on Mobile Networks. ITU Publications, 2018. – 280 p.
4. ETSI. ETSI Standards for IoT and Mobile Communications. ETSI Press, 2019. – 200 p.
5. Kumar, P., Reddy, S. Evolution of Cellular Networks: From GSM to 5G. Journal of Wireless Communications, 2022. – 450 p.
6. J. Zhang, M. Z. Shakir, S. Zeadally, and C. Yuen, "Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) for Mobile Communications," Springer, 2010.
7. A. Ghosh, "HSPA+ and LTE for Mobile Broadband: Evolution to LTE-Advanced," Cambridge University Press, 2011.
8. 3GPP, "Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) Technical Specifications," 3GPP TS 25.101, 2000.
9. R. Ratasuk, "MIMO Technology and Performance in 3G and Beyond," IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 5, 2011.
10. Dahlman, E., Parkvall, S., & Skold, J. 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Academic Press, 2014. – 450 p.
11. Huang, L., & Liu, Y. Introduction to LTE/LTE-Advanced: Evolution of Mobile Networks. Elsevier, 2018. – 250 p.
12. 3GPP TS 36.300 LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Packet Core (EPC); Overall Description. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2020. – 500 p.
13. ETSI. ETSI Standards for IoT and Mobile Communications. ETSI Press, 2019. – 200 p.



14. Zhang, L., & Miao, L. 5G Mobile Networks: A Systems Approach. Cambridge University Press, 2019. – 300 p.
15. Akdeniz, M., & Nallanathan, A. LTE-Advanced and 5G: Future Mobile Communications. Springer, 2017. – 350 p.
16. ITU-R. IMT Vision - Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. Technical Report M.2083, ITU-R, September 2015.
17. Wang, C. X., & Zhang, J. 5G Mobile Networks: From LTE to Beyond. Wiley, 2016. – 250 p.
18. ITU-R. IMT-2020 Requirements and Evaluation. International Telecommunication Union, 2021. – 75 p.
19. Hossain, E., & Cho, Y. 5G Mobile Communications. Springer, 2017. – 350 p.
20. Rappaport, T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. Prentice Hall, 2002. – 1050 p.
21. Andrews, J. G., & Ghosh, A. 5G: Theory and Practice. Cambridge University Press, 2019. – 400 p.
22. ETSI. ETSI Standards for IoT and Mobile Communications. ETSI Press, 2019. – 200 p.
23. Zheng, K., & Xu, J. Mobile Communications: Challenges in 5G and Beyond. Springer, 2020. – 300 p.
24. Ericsson, Sierra Wireless. IMT-2020 Self-Evaluation: mMTC Coverage, Data Rate, Latency and Battery Life. Technical Report R1-1903119, Ericsson, Sierra Wireless, March 2019.
25. Ch. Kuhlins, B. Rathonyi, A. Zaidi, and M. Hogan. Cellular Networks for Massive IoT. Technical Report Uen 284 23-3278, Ericsson, January 2020
26. A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi. Internet of Things for Smart Cities. IEEE Internet of Things Journal, vol. 1(no. 1): pp. 22–32, 2014.
27. F. Dian, R. Vahidnia, and A. Rahmati. Wearables and the Internet of Things (IoT), Applications, Opportunities, and Challenges: A Survey. IEEE Access, vol. 8:69200–69211, 2020.

