

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Буренко Володимир Олександрович

УДК 004.67:004.77:620.98

ДИСЕРТАЦІЯ
**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ
В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ ЕНЕРГОНЕЗАЛЕЖНИХ
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖ**

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки
Галузь знань 12 Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 В. О. Буренко

Науковий керівник Чернов Сергій Костянтинович, д-р техн. наук, професор

Миколаїв – 2026

АНОТАЦІЯ

Буренко В. О. Математичні моделі для обробки інформації в комп'ютерних системах енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню науково-прикладної задачі розробки моделей та розвитку методів інформаційно-комп'ютерної технології оптимізації транспортної підсистеми пасажирських перевезень у складі системи «розумного міста» для підтримки цифрової економіки, зосереджуючись на розвитку розумних міст, розумної економіки та розумних громадян.

Актуальність досліджуваної проблематики пов'язана із необхідністю виявлення системних проблем і факторів упередженості, що стримують сталий розвиток транспортної інфраструктури загалом і сфери пасажирських перевезень зокрема в межах концепції «розумного міста».

Перший розділ дисертації присвячений аналізу напрямків розвитку європейської парадигми «розумного міста», сучасних підходів до визначення обсягу пасажиропотоку із застосуванням технологій обробки зображень з IP-камер інформаційно-вимірювальної мережі КС «розумне місто». Доведено, що обробка даних з систем IP-відеоспостереження ІВМ у режимі реального часу є перспективним напрямком для створення та оптимізації інтелектуального транспортного середовища «розумного міста», що відповідає Цілі 11 «Сталий розвиток міст і громад» програми ООН до 2030 р.

Дослідження нинішнього стану та перспектив розвитку підсистем КС «розумне місто» виявило необхідність підвищення оперативності та якості організації міського пасажирського транспорту (МПТ), що можливо за рахунок розробки нових інформаційно-комп'ютерних технологій (ІКТ) на основі використання даних з інформаційно-вимірювальних мереж (ІВМ) комп'ютерної

системи (КС) «розумне місто» та створення на їх основі математичних моделей та програмних засобів для підтримки прийняття рішень у режимі реального часу щодо оптимізації функціонування МПТ.

Другий розділ зосереджено на розробленні математичних моделей для обробки інформації в комп'ютерних системах енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж (ІВМ), використання яких дозволить автоматизувати моніторинг в реальному часі та планування подачі міського транспорту шляхом обробки даних, отриманих із ІР-камер.

Наукова новизна запропонованого підходу до процесу оброблення зображень з ІР-камер КС «розумне місто» полягає у визначенні введених інтегрального та нормованого індексів наповненості кадру кожної зупинки у реальному часі на основі аналізу інформаційної складності сцени за допомогою ентропії Шеннона, контрастної складової RGB-гістограми зображення та міжкадрової відмінності зображення наповненої пасажирями та порожньої зупинки МПТ. Використовуючи запропоновану систему показників, можна оцінювати рівень наповненості зупинок пасажирями на різних маршрутах.

Для збільшення часу енергонезалежності диспетчерських пунктів перевізників як осіб, що приймають рішення щодо подачі ТЗ на маршрут, розроблено математичну модель оптимізованого енергоспоживання у локальних пунктах IoT-пристроями як хостами ІВМ для оброблення зображень експертами перевізників. Аналіз моделювання показує, що зменшити коефіцієнт завантаженості центрального процесора (ЦП) IoT-пристрою можливо шляхом розподілу обчислень у режимі реального часу між ядрами ЦП такого пристрою.

Розроблені спрощені одновимірні математичні моделі зменшеного порядку для об'єктів ІВМ «розумного міста» дозволяють здійснювати оцінювання часу енергонезалежності сегменту ІВМ на зупинці МПТ при використанні задіяного джерела живлення та планувати своєчасне та автоматизоване переключення хоста ІВМ на альтернативне джерело живлення.

Наведені результати моделювання показали функціональну працездатність розроблених математичних моделей. На відміну від відомих результатів

з використанням нейромережових методів, дослідження показало, що запропоновані моделі мають значно меншу обчислювальну складність та не потребують апаратного прискорення.

У третьому розділі розглядається процес побудування ієрархічних, маргінальних та математичних моделей для задачі вибору ТЗ для подачі на заповнені зупинки МПТ. Для прийняття рішення побудовано концептуальні ієрархічні моделі вигод та витрат, розглянуто можливість та необхідність побудування додаткових ієрархічних моделей за критеріями, обраними відповідно до методології BOCR (Benefits–Opportunities–Costs–Risks).

Запропоновано вдосконалену модель, в якій виконується розщеплення основних критеріїв на підкритерії, кількість та зміст яких може варіюватись в залежності від зміни оточуючих умов та виникаючих додаткових проблем.

Для об'єднання групових експертних оцінок (ЕО) запропонований метод, що дозволяє синтезувати колективне рішення різних підгруп експертів, враховуючи різні способи представлення вподобань експертів (нечіткі, точкові та ін. оцінки). Даний метод дозволяє моделювати невизначеності, які породжуються суперечливими експертними свідченнями, і не накладає жорстких обмежень на спосіб подання ЕО. На відміну від наявних, запропонований метод забезпечує обробку експертних суджень будь-якої структури: узгоджених, еквівалентних, довільних тощо. Він також враховує можливі об'єднання та перетини експертних свідчень.

У четвертому розділі розроблені програмні засоби реалізації математичних моделей та методів інформаційно-комп'ютерної технології, розглянутих у попередніх розділах. Висвітлено етапи проектування та конфігурації програмного забезпечення (ПЗ), призначеного для моніторингу пасажиропотоку визначенні рівня завантаженості зупинок громадського транспорту. Представлено розробку користувацького інтерфейсу для роботи з даними IBM КС «розумне місто». Проведено тестування ПЗ та доведено, що використання результатів дослідження дозволить покращити якість обслуговування громадян та оптимізувати рух міського пасажирського транспорту.

За результатами досліджень розроблена інформаційно-комп'ютерна технологія, яка може бути інтегрована у підсистему МПТ КС «розумне місто», спрямована на синтез консолідованих експертних рішень щодо диспетчеризації МПТ у режимі реального часу, з урахуванням факторів невизначеності та нечіткості вхідної інформації, для підтримки прийняття рішень з організації бізнес-процесу пасажирських перевезень міським автотранспортом на основі аналізу рівня наповненості зупинок за даними з ІР-камер.

Результати дослідження впроваджено у науково-дослідні роботи за підтримки Міносвіти і науки України (№ держ. реєстрації 0118U000193 та 0117U007144), у навчальний процес Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (ОПП «Комп'ютерні науки» та ОПП «Управління проєктами»), у виробничу діяльність комерційного та комунального підприємств, а також апробовано на міжнародних і всеукраїнських конференціях.

Запропоновані підходи можуть бути також ефективно використані в системах моніторингу натовпу, планування заходів безпеки в громадських просторах, управління корпоративними мережами, реалізацію концепцій «розумного міста» та платформ Інтернету речей (IoT), а також у науково-дослідну діяльність і навчальний процес підготовки спеціалістів за спеціальністю 122/F3 «Комп'ютерні науки».

Ключові слова: інформаційна технологія, експертна система, прийняття рішень, інноваційний проєкт, оптимізація, система реального часу, моніторингова система, комп'ютерна мережа, пасажирські перевезення, «розумне місто», модель, IoT-пристрій, ІР-камера, обробка зображень, енергоефективність.

ABSTRACT

Burenko V. O. Mathematical models for information processing in computer systems of non-volatile information-measuring networks. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the Doctor of Philosophy scientific degree in the specialty 122 Computer Sciences (branch of knowledge 12 – Information Technologies). – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2026.

The PhD thesis is devoted to solving the scientific and applied problem of developing models and methods of information and computer technology optimizing the passenger transport subsystem within the Smart City system to support the digital economy, focusing on the development of Smart Cities, Smart Economy, and Smart Citizens.

The relevance of the researched problem is associated with the necessity of identifying systemic problems and bias factors that hinder the sustainable development of transport infrastructure in general and the sphere of passenger transportation in particular within the framework of the "Smart City" concept.

The first chapter of the dissertation is devoted to the analysis of development trends of the European Smart City paradigm and modern approaches to determining passenger flow volume using image processing technologies from IP cameras of the Smart City CS information-measuring network. It has been proven that real-time processing of video data from the IMN is a promising direction for creating and optimizing the intelligent transport environment of the Smart City, which aligns with Sustainable Development Goal (SDG) 11 "Sustainable Cities and Communities" of the "Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development" by United Nations. The study of the current state and development prospects of "Smart City" CS subsystems revealed the necessity of increasing the operational efficiency and quality of urban passenger transport (UPT) organization, which is possible through the development of new information-computer technologies (ICT) based on using data from

information-measuring networks (IMN) of the "Smart City" computer system (CS) and creating, based on them, mathematical models and software tools for real-time decision support regarding the optimization of UPT functioning.

The second chapter focuses on the development of mathematical models for information processing in computer systems of energy-independent information-measuring networks (IMN), the use of which will allow automating real-time monitoring and planning the provision of urban transport by processing data obtained from IP cameras. The scientific novelty of the proposed approach to the process of processing images from IP cameras of the "Smart City" CS lies in determining the introduced integral and normalized frame occupancy indices of each stop in real time based on the analysis of the information complexity of the scene using Shannon entropy, the contrast component of the image RGB histogram, and the inter-frame difference between the image of a passenger-filled and an empty UPT stop. Using the proposed system of indicators, it is possible to assess the level of passenger occupancy of stops on various routes.

To increase the energy independence time of carrier dispatch points acting as decision-makers regarding the dispatch of vehicles to the route, a mathematical model of optimized power consumption at local points by IoT devices functioning as IMN hosts for image processing by carrier experts has been developed. Modeling analysis demonstrates that reducing the central processing unit (CPU) load factor of the IoT device is possible by distributing real-time computations among the CPU cores of such device.

The developed simplified one-dimensional reduced-order mathematical models for objects of the "Smart City" IMN allow estimating the energy independence time of the IMN segment at a UPT stop when using the utilized power source and planning the timely and automated switching of the IMN host to alternative power source.

The presented simulation results demonstrated the functional operability of the developed mathematical models. Unlike known results using neural network methods, the research showed that the proposed models have significantly lower computational complexity and do not require hardware acceleration.

The third chapter considers the process of constructing hierarchical, marginal, and mathematical models for the problem of selecting vehicles for dispatch to filled urban passenger transport stops. For decision-making, conceptual hierarchical models of benefits and costs have been constructed, and the possibility and necessity of constructing additional hierarchical models based on criteria selected in accordance with the BOCR (Benefits–Opportunities–Costs–Risks) methodology have been considered.

An improved model is proposed, in which the splitting of main criteria into sub-criteria is performed; the number and content of these sub-criteria may vary depending on changes in environmental conditions and emerging additional problems.

To aggregate group expert assessments, a method is proposed that allows synthesizing the collective decision of various subgroups of experts, taking into account different ways of representing expert preferences (fuzzy, point, and other estimates). This method uncertainties generated by contradictory expert evidence and does not impose strict restrictions on the method of presenting expert assessments. Unlike existing methods, the proposed method approach ensures the processing of expert judgments of any structure: consistent, equivalent, arbitrary, etc. It also takes into account possible unions and intersections of expert evidence.

The fourth section develops the software for implementing mathematical models and methods of information and computer technology considered in the previous sections. The stages of designing and configuring the software intended for monitoring passenger flow and determining the occupancy level of public transport stops are highlighted. The development of a user interface for working with data from the Smart City CS IMN is presented. Testing of the software was conducted, and it was proven that the use of the research results will allow for improving the quality of service for citizens and optimizing the movement of urban passenger transport.

Based on the research results, an information-computer technology has been developed, which can be integrated into the UPT subsystem of the "Smart City" CS; it is aimed at synthesizing consolidated expert decisions regarding UPT dispatching in real time, taking into account factors of uncertainty and fuzziness of input information, for

decision support in organizing the business process of urban passenger transportation based on the analysis of stop occupancy levels using data from IP cameras.

The research results have been implemented in research projects supported by the Ministry of Education and Science of Ukraine (State Registration Nos. 0118U000193 and 0117U007144), into the educational process of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding (Educational and Professional Programs "Computer Sciences" and "IT Project Management"), into the production activity of commercial and municipal enterprises, and have also been validated at international and all-Ukrainian conferences.

The proposed methods can also be utilized in crowd monitoring systems and security planning in public places, corporate networks, "smart" spaces and Internet of Things (IoT) platforms, scientific research, as well as in the educational process for training specialists in the specialty 122/F3 Computer Sciences.

Keywords: *information technology, expert system, decision-making, innovative project, optimization, real-time system, monitoring system, computer network, passenger transportation, Smart City, model, IoT device, IP camera, image processing, energy efficiency.*

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Буренко В. О., Чернов С. К. Синтез групових рішень для рішення задачі вибору транспортних засобів в процесі логістичного забезпечення міських пасажироперевезень. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами.* 2025. № 1 (10). С. 18–28.
DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2025.10.3>. URL: <http://pm.khpi.edu.ua/article/view/341950> Кат. Б
2. Буренко В. О. Групові експертні оцінки обробки інформації в комп'ютерних системах «розумного міста». *Вісник Херсонського національного технічного університету.* 2024. № 2 (89). С. 118–125. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.16>. URL: https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/article/view/634 Кат. Б
3. Буренко В. О. Аналіз наповненості зупинок пасажирського транспорту за допомогою алгоритмів обробки зображень з IP-камер «розумного міста». *Вісник Хмельн. нац. ун-ту. Серія: Технічні науки.* 2023. Т. 325, № 5 (1). С. 47–52.
DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-325-5>. URL: <https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/455> Кат. Б
4. Bozhatkin S., Guseva-Bozhatkina V., Farionova T., Pasiuk B., Burenko V. Emergency notification computer system via telecommunication equipment of the organization's local network. *Computer systems and information technologies.* 2023. Vol. 1, no. 10. P. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2023-1-3>. URL: <https://csitjournal.khmnu.edu.ua/index.php/csit/article/view/200> Кат. Б
5. Журавська І. М., Савінов В. Ю., Корецька О. О., Буренко В. О. Розподілення навантаження між багатоядерними обчислювачами для задач енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж. *Наукові праці / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили.: наук. журн. Миколаїв, 2017. Т. 307, Вип. 295. С. 42–46* (Серія : Комп'ютерні технології). URL:

видання (немає DOI, але опубл. ДО Пост. КМУ № 44)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

– друковані праці конференцій, які включені до міжнародних наукометричних баз

6. Obukhova K., Zhuravska I., Burenko V. Diagnostics of power consumption of a mobile device multi-core processor with detail of each core utilization. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* : Proc. of the 2020 IEEE 15th Int. Conf., Lviv, Ukraine, Feb. 25–29, 2020 / Lviv Polytechnic National University. P. 368–372. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235456>. ISBN (IEEE): 978-1-7281-5566-1. Scopus EID: 2-s2.0-85085479130. WoS ID: 000578041000077.

– інші матеріали конференцій

7. Burenko V. O., Guseva-Bozhatkina V. A. Development of models for the decision-making process regarding the choice of urban passenger vehicles. *SWorld-Ger Conference on Future in the results of modern scientific research*, Germany, Karlsruhe, 20 Aug. 2025. P. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.30890/2709-1783.2025-40-00-003>. URL: <https://www.proconference.org/index.php/gec/issue/view/gec40-00/gec40-00> (Last accessed: 20.10.2025).

8. Буренко В. О. Моделювання подачі та завантаження міського транспорту на основі даних системи «Розумне місто». *Ольвійський форум – 2025: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі* : тези доп. XXII Міжнар. наук. конф., Миколаїв, 16–21 черв. 2025 р. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2025. С. 52–55. DOI: <https://doi.org/10.34132/mspc2025.01.06.09>. URL: <https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/2830> (дата звернення: 27.06.2025).

9. Буренко В. О. Використання технології Інтернету речей для підрахування людей на зупинках міського транспорту у системі «розумне місто».

Мехатронні системи: інновації та інжиніринг (MSIE-2024) : тези доп. VIII Міжнар. наук.-практ. конф. / Київ. нац. ун-т технологій та дизайну, Київ, 07 листопада 2024 р. Київ, 2024. С. 187–188. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/28607/1/Mechatronic%20systems_MSIE%202024.pdf (дата звернення: 27.03.2025).

10. Буренко В. О., Гусєва-Божаткіна В. А. Обробка інформації з комп'ютерної системи «розумне місто» для подачі евакотранспорту в умовах воєнного стану. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : тези доп. XV Міжнар. наук.-техн. конф. / Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, 26–27 вересня 2024 р. Миколаїв : НУК, 2024. С. 602–605. URL: <https://rep.nuos.edu.ua/server/api/core/bitstreams/59e5722f-538b-450b-ad94-7316f21bfbfb/content> (дата звернення: 01.11.2024).

11. Буренко В. О. Алгоритми обробки зображень в інформаційно-вимірювальній мережі моніторингу наповненості зупинок пасажирського транспорту. *Інформаційні технології і автоматизація – 2023* : тези доп. XVI Міжнар. наук.-практ. конф. / Одес. нац. технолог. ун-т, Одеса, 19–20 жовтня 2023 р. Одеса : Вид-во ОНТУ, 2023. С. 35–37. URL: <https://ontu.edu.ua/itia> (дата звернення: 30.10.2024).

12. Буренко В. О. Інформаційні технології аналізування потреби та управління транспортними пасажиропотоками в smart-city. *Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій* : матеріали XXIII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів / Одес. нац. технолог. ун-т, Одеса, 20–21 квітня 2023 р. Одеса : Вид-во ОНТУ, 2023. С. 207–208. URL: <https://card-file.ontu.edu.ua/items/0e304d93-0867-4813-87b5-f4a6e7ef2826> (дата звернення: 18.12.2025).

13. Божаткін С. М., Буренко В. О. Достовірність передачі даних в інформаційних системах управління живленням за допомогою Wi-Fi. *Сучасні проблеми інформаційної безпеки на транспорті* : зб. тез V Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю, Миколаїв, 26–28 листопада 2015 р. С. 100–101.

**Список публікацій, які додатково відображають наукові результати
дисертації**

14. Burenko V. O. Planning of urban transport delivery according to data from the non-volatile information-measurement network of the Smart City. *Modern engineering and innovative technologies*. 2025. Is. 40. P. 106–120. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2025-40-01-026>. ISSN 2567-5273. URL: <https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit40-01/meit40-01> **ОЕСР**

(Німеччина)

15. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 139638. Комп'ютерна програма «PASSENGER COUNTING VIA IP CAMS» : комп'ютерна програма / В. О. Буренко ; дата реєстр. 23.09.2025 ; опубл. 31.10.2025, Бюл. № 94. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1883726/>.

16. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 139134. Комп'ютерна програма «BRIGHTNESS_HISTOGRAM» : комп'ютерна програма / В. О. Буренко, В. А. Гусєва-Божаткіна ; дата реєстр. 28.08.2025 ; опубл. 30.09.2025, Бюл. № 93. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1878768/>.

17. Гусєва-Божаткіна В. А., Фаріонова Т. А., Божаткін С. М., Буренко В. О. Спосіб індивідуальної активізації освітлювальних ламп, підключених до освітлювальної системи з мікропроцесорним управлінням з живленням від однофазної мережі. Пат. на корисну модель 133447 Україна, МПК H05B 39/04 (2006.01). № u201810299 ; заявл. 17.10.2018 ; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 7/2019. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1344750/>.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОЦІНЮВАННЯ ОБСЯГУ ПАСАЖИРОПОТОКУ У КОНЦЕПЦІЇ «РОЗУМНОГО МІСТА» ТА ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	27
1.1 Напрямки розвитку європейської парадигми «розумного міста»	27
1.2 Сучасні підходи до визначення обсягу пасажиропотоку	29
1.2.1 Трекінгові системи «розумного міста» для обліку пасажиропотоку	29
1.2.2 Технології машинного навчання та штучного інтелекту для виявлення та класифікації об'єктів на основі даних відеоспостереження	32
1.2.3 Аналіз програмних засобів комп'ютерного зору та оброблення зображень.....	35
1.3 Сучасні інформаційні технології у сфері організації міських пасажироперевезень.....	43
1.4 Обґрунтування необхідності проведення досліджень за обраною темою ...	45
Висновки до розділу 1	50
Список використаних джерел до розділу 1	51
РОЗДІЛ 2 ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА МЕРЕЖА КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ «РОЗУМНЕ МІСТО» ДЛЯ АНАЛІЗУ НАПОВНЕНOSTІ ЗУПИНОК ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ	59
2.1 Методи обробки зображень з IP-камер IBM КС «розумне місто»	60
2.2 Математичні моделі аналізу RGB-зображень з IP-камер IBM КС «розумне місто».....	65
2.2.1 Ентропійна характеристика сцени	65
2.2.2 Контрастна складова.....	66
2.2.3 Міжкадрова відмінність	67
2.2.4 Інтегральний індекс наповненості кадру.....	68
2.2.5 Нормований індекс наповненості кадру	69
2.3 Аналіз зображень з IP-камер на зупинках за побудованою математичною моделлю.....	71

2.4 Розробка моделі енергоспоживання IoT-пристроїв як хостів IBM KC «розумне місто».....	74
2.4.1 Математична модель енергоспоживання IoT-пристрою на основі багатоядерного процесора.....	74
2.4.2 Розробка математичних моделей об'єктів IBM.....	83
2.5 Побудова енергонезалежних IBM з організацією живлення IP-камер на зупинках від альтернативних джерел живлення.....	85
Висновки до розділу 2	88
Список використаних джерел до розділу 2	90
РОЗДІЛ 3 ПОБУДОВА МОДЕЛІ ГРУПОВИХ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПОДАЧІ МІСЬКОГО ТРАНСПОРТУ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ БАГАТОВИМІРНИХ ДАНИХ З ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖ «РОЗУМНОГО МІСТА».....	
3.1 Моделювання процесів прийняття рішень щодо розподілу та вибору пасажирського транспорту	95
3.1.1 Концептуальні ієрархічні моделі.....	95
3.1.2 Маргінальні моделі	101
3.1.3 Математичні моделі.....	103
3.2 Формування групових рішень щодо організації подачі ТЗ на зупинки міського транспорту в умовах невизначеності та неповних даних	104
3.3 Виділення підгруп експертів на основі узгодженості оціночних суджень	114
3.3.1 Методи розв'язання задачі формування структури групи експертів ...	114
3.3.2 Математична модель формування підгруп експертів	116
Висновки до розділу 3	124
Список використаних джерел до розділу 3	126
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПОВНЕНOSTІ ПАСАЖИРАМИ ЗУПИНОК МІСЬКОГО АВТОТРАНСПОРТУ	
4.1 Розробка ПЗ перетворення зображення на гістограму яскравості.....	131
4.2 Розробка ІС для накопичення інформації з IP-камер IBM KC «розумне місто».....	138

4.3 Розробка користувацького інтерфейсу для роботи з даними IBM	
КС «розумне місто»	143
Висновки до розділу 4	149
Список використаних джерел до розділу 4	150
ВИСНОВКИ	152
ДОДАТОК А Документи щодо впровадження та використання результатів дисертаційної роботи	155
А.1 Довідка про використання результатів в НДР	155
А.2 Акт впровадження результатів в навчальний процес.....	156
А.4 Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у КП «Міський інформаційно-обчислювальний центр» Миколаївської міської ради	158
ДОДАТОК Б Список опублікованих наукових праць за темою дисертації	160
ДОДАТОК В Розрахунок індексу $SFI(t)$ на основі аналізу кадрів з ІР-камер	164
В.1 Результати розрахунків для маршруту № 16 М/н Намив – ПАТ «Завод фільтруючого і мастильного обладнання»	164
В.2 Результати розрахунків для маршруту № 56 М/н Намив – М/н Північний	169
ДОДАТОК Г Основні метрики теорії свідоцтв	177
ДОДАТОК Д Розрахунки знаходження вектора локальних пріоритетів....	178
Д.1 За методом Чанга на основі оцінок експерта E_1	178
Д.2 За методом геометричного середнього на основі оцінок експерта E_2	181
ДОДАТОК Е Вихідний код розробленого програмного забезпечення.....	184
Е.1 Код комп'ютерної програми «BRIGHTNESS_HISTOGRAM».....	184
Е.2 Код комп'ютерної програми «PASSENGER COUNTING VIA IP CAMS»	187

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВМ	– віртуальна машина
ЕО	– експертне оцінювання
ІВМ	– інформаційно-вимірювальна мережа
ІС	– інформаційна система
КС	– комп’ютерна система
ККД	– коефіцієнт корисної дії
МАІ	– метод аналізу ієрархій (англ. АНР)
МПП	– матриця попарних порівнянь
МПТ	– міський пасажирський транспорт
НДР	– науково-дослідна робота
ОС	– операційна система
ПЗ	– програмне забезпечення
ТЗ	– транспортний засіб
ТНЧ	– трикутне нечітке число
ЦП	– центральний процесор (англ. CPU)
ЦСР	– ціль сталого розвитку
ШІ	– штучний інтелект (англ. AI)
АНР	– Analytic Hierarchy Process
AI	– Artificial Intelligence
ANN	– Artificial Neural Network
API	– Application Programming Interface
AWS	– Amazon Web Services
BANI	– Brittle, Anxious, Nonlinear, Incomprehensible
BOCR	– Benefits – Opportunities – Costs – Risks
CCTV	– Closed Circuit Television
CNN	– Convolutional Neural Network
CPN	– Colored Petri Net
CPU	– Central Processing Unit

GPS	– Global Positioning System
ICT	– Information and Communication Technologies
IMN	– Information-Measuring Network
I/O	– Input/Output
IoT	– Internet of Things
IP	– Internet Protocol
MAE	– Mean Absolute Error
ML	– Machine Learning
MSE	– Mean Squared Error
PCR5	– Proportional Conflict Redistribution Rule № 5 (укр. правило пропорційного перерозподілу конфліктів)
RNN	– Recurrent Neural Network
SDGs	– Sustainable Development Goals
SE	– Shannon Entropy
SFI	– Scene Fullness Index
SSD	– Single Shot Detector
Wi-Fi	– Wireless Fidelity
YOLO	– You Only Look Once

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Дисертаційна робота присвячена розв’язанню науково-прикладної задачі розробки моделей та розвитку методів інформаційно-комп’ютерної технології оптимізації транспортної підсистеми пасажирських перевезень у складі системи «розумного міста» для підтримки цифрової економіки, зосереджуючись на розвитку розумних міст, розумної економіки та розумних громадян. Європейська комісія визначає розумне місто як «місце, де існуючі комунікаційні та сервісні мережі можуть бути використані для впровадження більш ефективних цифрових рішень на благо мешканців та бізнесу».

«Розумне місто» (англ. Smart City) – це складна розподілена комп’ютерна система (КС), яка інтегрує апаратні, програмні та інформаційні компоненти. До її складу входять: сенсори та IoT-пристрої; інформаційно-вимірювальні мережі (ІВМ); телекомунікаційні мережі передачі даних; обчислювальні платформи; програмні системи обробки, аналізу та зберігання даних; інтелектуальні алгоритми (AI, ML, комп’ютерний зір); людина як елемент керування та прийняття рішень.

Концепція «розумного міста» базується на IT-рішеннях, які постійно модернізуються та адаптуються до конкретних потреб окремих підсистем КС «розумне місто». Завдяки доступу до інформації в режимі реального часу вони допомагають приймати ефективніші рішення для користувачів міста, покращити якість послуг, що надаються містянам. Одною з найважливіших підсистем, що базуються на IT-рішеннях, є підсистема міського пасажирського транспорту (МПТ). Оцінювання в реальному часі наповненості зупинок пасажирами має надати необхідну інформацію для своєчасної подачі транспортних засобів (ТЗ) для розвантаження зупинок. Це можливо через отримання з IP-камері на зупинках відповідних зображень та створення відповідного математичного апарату для їх аналізу. Але слід враховувати великий обсяг даних з такої ІВМ та обмежений час для прийняття відповідних рішень. До того ж, слід враховувати обмежений час енергонезалежності обладнання такої ІВМ, IoT-пристроїв у диспетчерів

перевізників гаджетів у пасажирів. Тому останні підходи підкреслюють зв'язок між зростаючими можливостями сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій (ІКТ) та необхідністю їх використання на обладнанні з обмеженими обчислювальними та енергоресурсами у реальному часі.

Дослідження у зазначених напрямках розвиваються в Україні завдяки науковим школам проф. Бушуєва С. Д., Бушуєвої Н. С., Данченко О. Б., Кононенко І. В., Передерія В. І., Чернова С. К., Чумаченко І. В. у напрямку підвищення ефективності прийняття рішень та управління ІТ-проєктами, вдосконалення систем моніторингу та експертних систем. Активні дослідження з питань моделювання бізнес-процесів в ІТ-проєктах з урахуванням умов невизначеності та вимог до енергоефективності, ведуться Волком М. О., Косенко В. В., Мірошник М. А., Михелєвим І. Л., Молокановою В. М., Чумаченко Д. І., Осипенко В. В. та ін.

Наразі в межах концепції «розумного міста» недостатньо опрацьовані питання аналізу міських пасажирських перевезень, а також виявлення системних проблем і факторів упередженості, що стримують сталий розвиток транспортної інфраструктури загалом і сфери пасажирських перевезень зокрема. Це зумовлює актуальність наукових досліджень у зазначеній галузі, зокрема проведення комплексного аналізу пасажиропотоків у міському середовищі та розроблення сучасних ефективних підходів до оптимізації функціонування МПТ, спрямованих на підвищення якості транспортного обслуговування населення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Проблематика роботи відповідає програмі Організації Об'єднаних Націй «Перетворення нашого світу: порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року», яку підписали 193 країни, зокрема Цілі 11 «Сталий розвиток міст і громад» з 17 Цілей сталого розвитку (ЦСР). Також напрямки роботи корелюють з визначеннями Програми ЄС «Цифрова Європа» (DIGITAL), а саме: «розумне місто – це місце, де існуючі комунікаційні та сервісні мережі можуть бути використані для впровадження більш ефективних цифрових рішень на благо мешканців та бізнесу».

Результати дисертаційної роботи одержано в межах виконання держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР) за фінансуванням Міністерства освіти та науки України (додаток А.1), в яких здобувач брав участь як виконавець:

– «Розроблення найсучаснішого інтерактивного навчально-тренажерного та аналітично-консультативного комплексу військово-цивільного призначення» (№ держ. реєстрації 0118U000193);

– «Розроблення інформаційно-комунікаційних технологій підтримки прийняття стратегічних рішень військово-цивільного призначення в умовах багатокритеріальності та невизначеності» (№ держ. реєстрації 0117U007144).

Метою дослідження є підвищити ефективність використання зображень з камер відеоспостереження у складі інформаційно-вимірювальних мереж (ІВМ) за рахунок розробки математичних моделей, які забезпечують виділення ознак образів, методів аналізу отриманої інформації та прийняття рішення для оптимізації функціонування прикладних комп'ютерних систем (КС).

Для досягнення поставленої мети визначено наступні **завдання дослідження**:

1) провести дослідження сучасних підходів для визначення обсягу пасажиропотоку на основі інформаційних технологій;

2) розробити математичні моделі та програмне забезпечення формування, оброблення та використання RGB-зображень з системи відеоспостереження КС «розумне місто» для своєчасної подачі громадського транспорту за існуючими маршрутами МПТ залежно від рівня наповнення зупинок пасажирями;

3) розробити математичні моделі оптимізованого енергоспоживання IoT-пристроями зі збільшенням часу енергонезалежності для роботи у локальних диспетчерських пунктах перевізників;

4) розробити моделі прийняття групових рішень щодо розподілу пасажирського транспорту в умовах багатокритеріальності та складних форм невизначеності при логістичному забезпечення мультимодальних пасажирських перевезень;

5) розробити інформаційно-комп'ютерну технологію (ІКТ) спрямовану на синтез консолідованих експертних рішень щодо диспетчеризації транспортних засобів, з урахуванням факторів невизначеності та нечіткості вхідної інформації для організації бізнес-процесу пасажирських перевезень міським автотранспортом на основі рівня наповненості зупинок пасажирами за даними ІВМ КС «розумне місто»;

6) впровадити в практику розроблені моделі та програмні засоби, які дозволяють покращити ефективність функціонування інформаційно-вимірювальних мереж на базі технологій та обладнання для відеоспостереження.

Об'єкт дослідження: процеси функціонування інформаційно-вимірювальних мереж комп'ютерної системи «розумне місто» у реальному часі при організації бізнес-процесу міських пасажирських перевезень.

Предмет дослідження: методи та засоби аналізу зображень, отриманих з ІР-камер комп'ютерної системи «розумного міста» для визначення рівня наповненості пасажирами зупинок міського транспорту, на основі дослідження математичних моделей та параметрів RGB-гістограм.

Для вирішення поставлених задач **використані методи** бінарізації зображень для аналізу кадрів з ІР-камер «розумного міста»; методи статистичного аналізу діаграм яскравості для визначення текстурної насиченості сцени; методи аналізу та синтезу математичних моделей для оцінювання наповненості зупинок пасажирського транспорту; методи експертного оцінювання для порівняння параметрів ТЗ при оптимізації рішень щодо вибору моделі ТЗ, який доцільно виводити на певний маршрут; методи нечіткої логіки для прийняття рішень щодо подачі ТЗ на зупинки на підставі визначення основних факторів, що мають найбільший вплив.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

– розроблена математична модель оброблення RGB-гістограм зображень з ІР-камер КС «розумне місто», яка на відміну від існуючих моделей обробки зображень забезпечує визначення рівня наповненості зупинок МПТ пасажирами

на основі запропонованих інтегрального та нормованого індексів наповненості кадрів, що дозволяє оптимізувати у реальному часі систему подачі МПТ без ідентифікації об'єктів та розпізнавання облич із залученням складних нейромережових алгоритмів, в умовах обмежених обчислювальних ресурсів обладнання КС «розумне місто» та у складних умовах енергопостачання;

– розроблена математична модель управління невизначеностями у системі підтримки прийняття рішень щодо вибору ТЗ для подачі на завантажені пасажирами зупинки міського транспорту, за рахунок розщеплення критеріїв моделі BOCR на низку підкритеріїв з урахуванням особливостей побудови та функціонування підсистеми МПТ у складі КС «розумне місто», що дозволяє полегшити побудову трудомістких експертних рішень для великомасштабних інформаційно-вимірювальних мереж КС «розумне місто».

Набув подальшого розвитку:

– метод аналізу ієрархій шляхом урахування переваг моделі BOCR у процесі синтезу групових рішень, представлених у шкалах об'єктів нечислового характеру для розв'язання задачі вибору транспортних засобів при логістичному забезпеченні міських пасажироперевезень, що дозволяє коректно працювати з експертними свідченнями, сформованими в умовах багатокритеріальності та складних форм невизначеності.

Удосконалено:

– математичну модель оптимізованого енергоспоживання у локальних пунктах оброблення зображень експертами перевізників засобами IoT-пристроїв шляхом розподілу виконуваних процесором IoT-пристрою обчислень у розрізі ядер, що дозволяє зменшити коефіцієнт завантаженості процесора та збільшити час енергонезалежності хостів IBM КС «розумне місто».

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні комплексної інформаційно-комп'ютерної технології (ІКТ), яка поєднує процес оброблення RGB-гістограм зображень з IP-камер КС «розумне місто», багатфакторний аналіз вибору ТЗ для подачі на визначені зупинки, підтримку прийняття рішень підгрупами експертів на основі узгодженості оціночних

суджень та візуалізацію актуальної інформації про наповненість зупинок міського транспорту на вебінтерфейсі. Використання розроблених програмних засобів та моделей створює передумови для результативного моніторингу й аналітичного опрацювання у реальному часі даних, що надходять з транспортних зупинок МПТ. Це, у свою чергу, забезпечує раціоналізацію транспортних потоків шляхом більш точного визначення актуальних потреб пасажирів та своєчасного реагування на динамічні зміни попиту у якнайшвидшій подачі ТЗ на заповнені зупинки МПТ.

Крім того, запропонований підхід має суттєве значення для підвищення рівня якості транспортного обслуговування населення. Використання ІР-камер як джерела інформації про рівень наповненості зупинок на різних маршрутах надає можливість гнучкого коригування розкладів руху та перерозподілу транспортних ресурсів відповідно до реальних умов експлуатації. У результаті це сприяє зростанню комфортності поїздок для громадян та формуванню їх позитивного враження від розвитку системи міського пасажирського транспорту як невід'ємної складової «розумного міста».

Результати дисертаційного дослідження мають вагоме практичне значення для розвитку та впровадження автоматизованих систем оброблення й аналізу зображень. Запропоновані підходи, моделі та методи можуть бути використані при проєктуванні інтелектуальних інформаційних систем відеоаналітики, зокрема в задачах виявлення, класифікації та відстеження об'єктів на основі даних відеоспостереження. Отримані результати доцільно застосовувати в системах моніторингу міського середовища, управління пасажирськими потоками, забезпечення громадської безпеки, а також у програмно-апаратних комплексах «розумного міста» та платформах Інтернету речей. Крім того, матеріали дослідження можуть бути використані в освітньому процесі підготовки фахівців за спеціальністю 122/F3 «Комп'ютерні науки» та в подальших науково-прикладних дослідженнях у галузі комп'ютерного зору та штучного інтелекту.

Основні результати дисертаційної роботи впроваджено:

- в наукову роботу Чорноморського національного університету ім. Петра Могили (м. Миколаїв), яка відображена в остаточних звітах НДР з № держ. реєстрації 0118U000193 та 0117U007144 (додаток А.1);
- у навчальний процес Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова для здобувачів за другим (магістерським) рівнем вищої освіти зі спеціальності 122 Комп'ютерні науки за ОПП «Комп'ютерні науки» у рамках дисципліни ОКЗ 2 «Математичне моделювання систем і процесів та методи оптимізації» та за ОПП «Управління проєктами» у рамках дисципліни ОК 8 «Методи та моделі прийняття рішень в управлінні проєктами»;
- у поточну роботу Сервісного центру компанії ТОВ “С&NT” при наданні послуг з монтажу та обслуговування систем відеоспостереження та мереж;
- в роботу КП «Міський інформаційно-обчислювальний центр» Миколаївської міської ради для оброблення зображень з ІР-камер КС «розумне місто» при забезпеченні функціонування підсистеми міських пасажирських перевезень.

За темою дисертаційного дослідження **опубліковано** 17 наукових праць (додаток Б), з них 5 статей – у періодичних наукових фахових виданнях України; 8 робіт апробаційного характеру у форматі тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях (у т. ч. 1 працю проіндексовано у наукометричній базі Scopus). Додатково відображають наукові результати дисертації: 1 стаття – в зарубіжному періодичному науковому виданні іншої держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) та Європейського Союзу; 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір; 1 патент на корисну модель.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційного дослідження, які представлені до захисту, одержані автором особисто та наведені в 17 публікаціях, з яких 9 одноособових: [1–3], [8–9], [11–12], [14–15]. У роботах, які опубліковані у співавторстві, автору належать теоретичні та практичні положення, відображені у характеристиці наукової новизни отриманих

результатів, а саме: [4] – розроблено структуру мережі з можливістю доступу з портативних (IoT) пристроїв; [5; 6; 13; 17] – розроблено математичну модель енергоспоживання багатоядерними обчислювачами для вирішення задач електроживлення енергонезалежних IBM; [7; 10] – розроблено модель бізнес-процесу для прийняття рішень щодо подачі транспорту для пасажироперевезень; [16] – розроблено алгоритм для програмної реалізації обробки зображень на кадрах з IP-камер системи «розумне місто».

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних:

- IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) (Ukraine, Lviv, 2020)

Scopus;

- SWorld-Ger Conference on Future in the results of modern scientific research (Germany, Karlsruhe, 2025);

- Міжнародна наукова конференція «Ольвійський форум: Стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі» (Миколаїв, 2025);

- Міжнародна науково-практична конференція «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг (MSIE-2024)» (Київ, 2024);

- Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2024);

- Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології і автоматизація» (Одеса, 2023);

- Всеукраїнська науково-технічна конференція «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій» (Одеса, 2023);

- Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні проблеми інформ. безпеки на транспорті» (Миколаїв, 2015).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів зі списками використаних джерел, висновків та шести додатків. Основний зміст роботи викладено на 154 сторінках друкованого тексту, містить 35 рисунків та 35 таблиць. Кількість використаних джерел у списках становить 137 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 190 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОЦІНЮВАННЯ ОБСЯГУ ПАСАЖИРОПОТОКУ У КОНЦЕПЦІЇ «РОЗУМНОГО МІСТА» ТА ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Напрямки розвитку європейської парадигми «розумного міста»

На теперішній час все більшого поширення набуває європейська парадигма «розумного міста», яка будується на трьох стовпах: енергетика, транспорт та інформаційно-комунікаційні технології (рис. 1.1) [1]. Між цими трьома секторами має бути постійно зростаюча інтеграція.



Рисунок 1.1 – Три стовпи концепції «розумного міста»
Європейської комісії (ЄК)
[сформовано автором на основі [1]]

Розвиток концепції «розумного міста» вимагає впровадження інтелектуальних інформаційно-комунікаційних технологій (англ. Information and Communication Technologies, ICT), здатних здійснювати автоматизований моніторинг стану міської інфраструктури у режимі реального часу.

Важливим складником транспортної інфраструктури виступають зупинкові пункти міського автомобільного транспорту, що забезпечують акумулювання

пасажирських потоків і мають істотний вплив на результативність функціонування транспортної системи в цілому. Реальні умови експлуатації таких об'єктів відзначаються суттєвими коливаннями інтенсивності пасажиропотоків, мінливістю параметрів освітлення, впливом метеорологічних чинників, а також наявністю обмежень щодо доступних обчислювальних ресурсів для оброблення даних з IBM КС «розумне місто».

З огляду на зазначене, актуальною науково-прикладною проблемою є створення підходів до визначення рівня наповненості зупинкових пунктів, що дозволяли б отримувати інформативні результати за умови мінімальних витрат обчислювальних ресурсів.

Проблематика отримання та оброблення даних щодо наповненості зупинок громадського транспорту на основі технологій комп'ютерного зору набуває все більшої актуальності у зв'язку з розвитком та поширенням концепції «розумного міста» в усьому світі [1; 2]. Актуальність дослідження зумовлена тим, що розвиток сучасних технологій та інфраструктури «розумного міста» відкриває нові можливості для підвищення ефективності планування міських транспортних перевезень із пріоритетом на зменшення енергоспоживання [2]. У сучасних дослідженнях наголошено, що для реалізації європейської парадігми розвитку «розумних міст» необхідна інтеграція між інформаційно-комп'ютерними технологіями (ІКТ), моделями транспортних систем та економним споживанням енергії [3].

Паралельно має розвиватися концепція створення енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж (ІВМ). Це відкриває перспективи для створення нового покоління ІКТ з інтегрованими IoT-пристроями, здатних ефективно працювати з різнорідними даними та забезпечувати необхідну якість вимірної інформації в складних та невизначених умовах [4], до яких доцільно віднести й складові комп'ютерної системи (КС) «розумне місто».

Для локалізації людей та розпізнавання траєкторії їх активності використовують різні методи, такі як інфрачервоне відстеження, акустична локалізація, зміна параметрів WiFi-сигналу тощо, але традиційним залишається

метод відстеження людей у просторі за допомогою IP-камер на основі комп'ютерного зору [5].

1.2 Сучасні підходи до визначення обсягу пасажиропотоку

1.2.1 Трекінгові системи «розумного міста» для обліку пасажиропотоку

На теперішній час дослідниками велика увага приділяється можливостям IoT-пристроїв у складі КС «розумне місто» [6–8]. Концепція «розумного міста» інтегрує Інтернет речей та ІКТ для створення інтелектуальної транспортної системи та застосування Інтернету речей для швидкого прийняття рішень. Для відстеження громадського транспорту та моніторингу пасажирів у режимі реального часу на основі Інтернету речей на конкретному міському маршруті можливо встановлення IoT-пристроїв або на кожній зупинці маршруту, або на кожному ТЗ, який знаходиться на маршруті.

Так, наприклад, існують розробки фіксації характеристик пасажиропотоку громадського транспорту на базі одноплатного 4-ядерного комп'ютера Raspberry Pi, коли відповідний контролер встановлюється біля водія і фіксує з використанням двох камер загальну кількість пасажирів за одне коло маршруту (рис. 1.2) з виділенням пильгової категорії (Beneficiaries), дітей (Children) та учнів (Pupillary) [9]. До комп'ютерної системи «розумного міста» дані передаються через GSM-мережу з такої та подібних трекінгових систем за 15–18 с [10].

Route		19
Vehicle		BO0769AX
Driver		Ivan Petrenko
Date		09/05/2017
Circle		1
Duration		2:28:18
Downtime		00:09:27
Passed way		15.2 km
Number of passengers	Complete	53
	Children	1
	Kids n/a	0
	Beneficiaries	9
	Pupillary	4
	Total	67
Track		Display

Рисунок 1.2 – Облік пасажирів у транспортному засобі за допомогою IoT-пристрою [9]

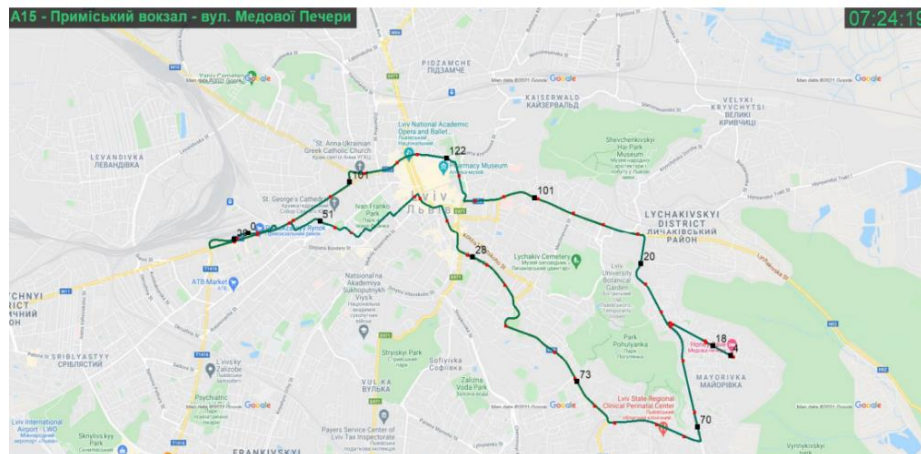
Архітектура трекінгової системи на базі IoT-приладів, встановлених на борту ТЗ, наведена на рис. 1.3. Похибка GPS-координат при цьому зазвичай становить приблизно 5–8 метрів [10].



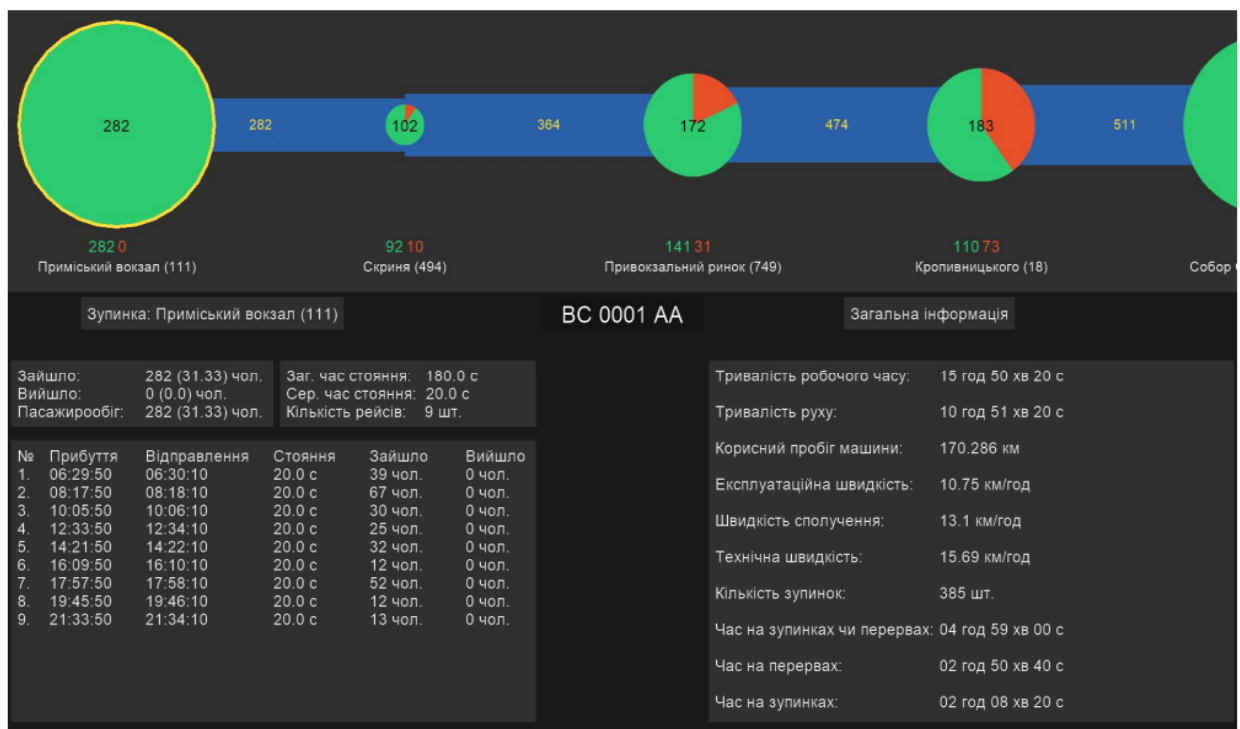
Рисунок 1.3 – Архітектура трекінгової системи обліку пасажирів за допомогою IoT-пристрою у транспортному засобі [сформовано автором на основі [10]]

Сучасним трендом є не тільки збереження даних у відповідній БД, але й їх наступне отримання через вебінтерфейс користувача та відображення поточного місцезнаходження ТЗ на карті Google з конкретизацією деяких параметрів,

наприклад, номерів маршрутів (рис. 1.4, а), або на власних маршрутних мапах з деталізацією обліку руху пасажирів через конкретний ТЗ (рис. 1.4, б) [10; 11].



а)



б)

Рисунок 1.4 – Візуалізація ТЗ на мапі «розумного міста» з деталізацією: номери маршрутів – зупинки (а), облік руху пасажирів на зупинках за конкретним часом протягом дня (б) [11]

Такий підхід дозволяє прийняти рішення компанії-перевізнику щодо економічної ефективності залучення саме обраної моделі (Vehicle на рис. 1.2) на підставі загальної завантаженості ТЗ, а міській владі – необхідний обсяг

фінансування транспортних видатків пильговим категоріям для управління соціальними проектами міського бюджету. Але на підставі даних, отриманих з IoT-пристроїв ТЗ, не можна визначити необхідну кількість автомобілів, яку необхідно подати на маршрут через відсутність даних щодо наявності пасажирів на зупинках маршруту.

Слід зауважити, що при використанні IoT-пристроїв у КС «розумного міста» необхідно враховувати їх обмежені апаратні ресурси, такі як малий обсяг пам'яті та необхідність мінімізації енергоспоживання [12].

1.2.2 Технології машинного навчання та штучного інтелекту для виявлення та класифікації об'єктів на основі даних відеоспостереження

У процесі становлення інфраструктури «розумного міста» застосування методів машинного навчання (Machine Learning, ML) створює суттєві передумови для підвищення ефективності керування транспортними потоками в режимі реального часу за рахунок високоточного прогнозування, адаптивних механізмів управління та забезпечення сталої міської мобільності. Ключовими напрямками використання ML у цій сфері є глибинні нейромережеві підходи, навчання з підкріпленням, методи кластерного аналізу, моделювання на основі даних Інтернету речей, а також гібридні обчислювальні моделі. Застосування прогнозно-аналітичних інструментів і адаптивних алгоритмів дозволяє динамічно коригувати маршрути руху транспортних засобів та регулювати рівень завантаженості дорожньої мережі шляхом оброблення інформації, що надходить від сенсорних пристроїв екосистеми Інтернету речей.

Алгоритми ML можуть аналізувати величезні обсяги даних, отриманих від датчиків Інтернету речей, GPS, IP-камер та IoT-пристроїв на борту ТЗ, вивчати закономірності, робити прогнози та навіть рекомендувати оптимальні рішення. Вони можуть допомогти оптимізувати маршрути, прогнозувати споживання енергії, керувати розкладами руху транспортних засобів, інформувати про стан інфраструктури та сприяти управлінню безпекою [13]. На відміну

від стаціонарних методів, ML постійно налаштовується, щоб виявляти приховані зв'язки в даних, та робить прогнози в режимі реального часу.

В дослідженні [14] показано можливість використання ML в громадському транспорті для розрахунку щільності людей або натовпу. Для знаходження людей в експерименті використано записи з трьох камер, розташованих у моделі мікроавтобуса. Час обчислення для моделей ML коливався від 0,35 до 100,57 мс, що є хорошим показником до успішного застосування в системах реального часу.

Використання нейронних мереж дозволяє оптимізувати маршрути МПТ, підвищити точність прогнозів обсягів пасажирських перевезень та провести комплексну оцінку якості міського пасажирського транспорту [15].

Згорткові нейронні мережі (англ. *Convolutional Neural Networks*, CNN), рекурентні нейронні мережі (англ. *Recurrent Neural Networks*, RNN) та штучні нейронні мережі (англ. *Artificial Neural Networks*, ANN) є одними з найефективніших архітектур глибокого навчання, які активно застосовуються у сучасних системах обробки даних. Кожна з них має власні переваги, що зумовлює їх ефективне застосування для різних типів задач.

Для орієнтовного підрахунку людей на зображенні використовують методи:

- а) detector-based: виявлення кожної людини (YOLO, Faster R-CNN);
- б) crowd density maps: карти щільності (CSRNet, MCNN) для великої кількості людей (натовпу);
- в) segmentation: виділення людей (Mask R-CNN, Segment Anything).

Зазначені методи аналізують форми, контури, голову/тіло людини.

У задачах детекції, класифікації та трекінгу об'єктів (у даному дослідженні – пасажирів міського транспорту) за даними IP-відеоспостереження КС «розумне місто» згорткові та рекурентні нейронні мережі мають визначальне значення, оскільки забезпечують автоматичне виявлення складних просторово-часових залежностей [16].

Серед різних методів машинного навчання, RNN є особливо перспективними для застосування в міському транспорті та логістиці завдяки їхній здатності обробляти послідовні дані [17].

Одним із прикладів ефективного використання згорткових нейронних мереж є система DeepSense [18]. Система застосовує часово-просторовий підхід глибокого навчання для прогнозування потоку транспорту з достатньою кількістю просторових та часових GPS-треків ТЗ з використанням алгоритмів обмеженої машини Больцмана (англ. Restricted Boltzmann Machine, RBM) та методу опорних векторів (англ. Support Vector Machines, SVM), як наведено на рис. 1.5.

Експериментальні результати показали, що DeepSense може досягти вищої точності прогнозування міських транспортних потоків з покращенням майже на 5 % порівняно з існуючими методами.

Але слід зазначити, що в задачах обліку людей CNN для навчання потребує декілька тисяч зображень [19; 20], тоді результати показують середню абсолютну похибку 1 людина на кадр, що еквівалентно 11 % відносної похибки [19]. Тому зазначений метод недоцільно використовувати у системах реального часу для обліку пасажирів на зупинках.

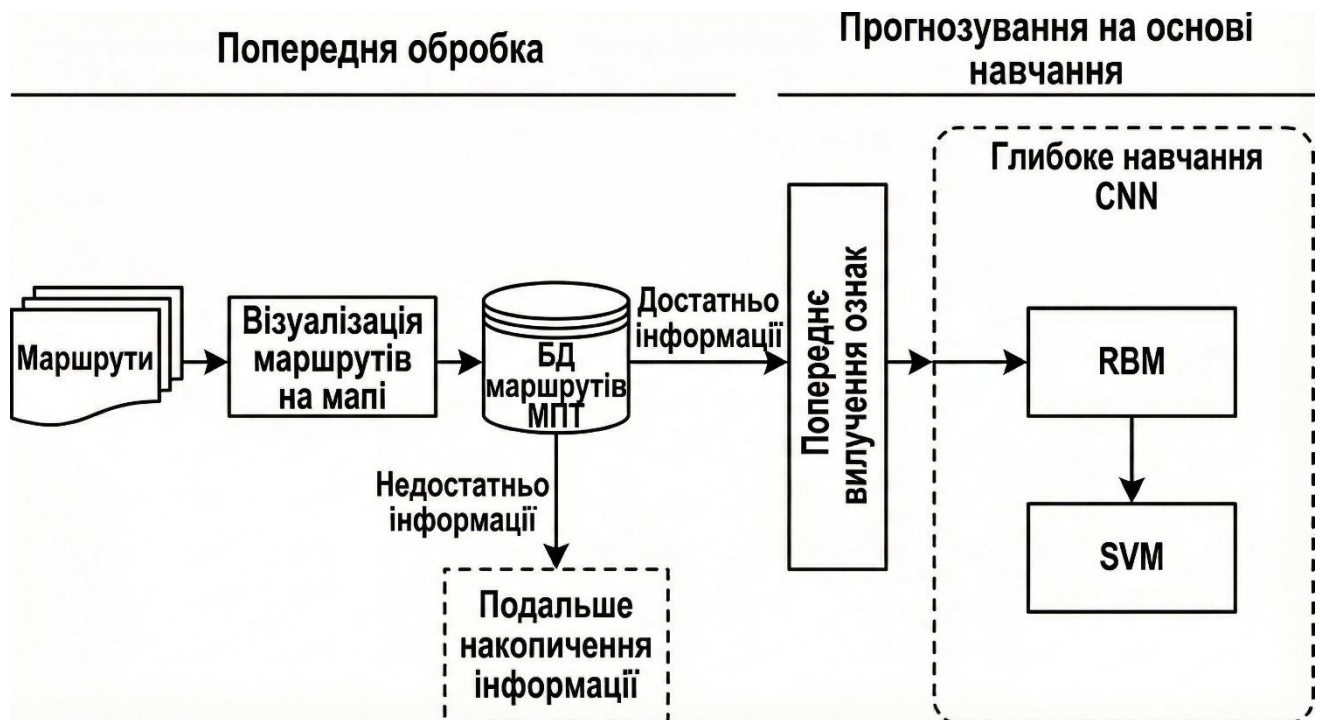


Рисунок 1.5 – Процес глибокого навчання для прогнозування потоку транспорту у системі DeepSense

[сформовано автором на основі [18]]

Таким чином, перевагами застосування глибокого навчання є:

- висока точність класифікації;
- здатність працювати з великими масивами даних;
- виявлення прихованих закономірностей без потреби у ручному

створенні ознак.

Однак ці переваги супроводжуються певними обмеженнями:

- висока обчислювальна складність;
- необхідність у значних обсягах анотованих даних для навчання.

З наведеного огляду можна дістати висновок, що використання ML та NN надає планувальникам бізнес-процесу організації МПТ потужну основу для використання записаних наборів даних для кращого розуміння та подальшої оптимізації транспортної мережі. В той же час, зазначені прогресивні технології доцільно застосовувати тільки у головному диспетчерському центрі КС «розумне місто», де наявні потужні обчислювальні ресурси. До того ж, щоб для ефективної роботи зазначених алгоритмів необхідні накопичені та доступні для аналізу дані достатньо великих обсягів за декілька років (до 10) за кожним маршрутом [21]. Для прийняття рішень на локальних маршрутах МПТ щодо розвантаження зупинок потрібні подальші дослідження з використанням менш енерговитратних пристроїв та технологій.

1.2.3 Аналіз програмних засобів комп'ютерного зору та оброблення зображень

Для визначення поточного стану досліджуваної предметної області виявлення та обліку людей на зображеннях було здійснено огляд наявних програмних продуктів із подібною функціональною спрямованістю.

Azure AI Vision є складовою хмарної платформи Microsoft Azure та призначена для застосування методів штучного інтелекту (ШІ) у задачах аналізу зображень і комп'ютерного зору [22].

Основні функціональні переваги Azure AI Vision:

- застосування високоефективних алгоритмічних методів для опрацювання візуальних даних, зокрема їх аналізу, біометричного розпізнавання та ідентифікації облич, детекції об'єктів і виконання інших процедур комп'ютерного зору;

- використання механізмів візуального пошуку з метою виявлення зображень зі схожими семантичними характеристиками або наявністю визначених об'єктів;

- надання розробникам програмного забезпечення програмних інтерфейсів прикладного програмування (англ. Application Programming Interface, API), що забезпечують інтеграцію засобів розпізнавання облич та оброблення зображень у власні інформаційні системи та застосунки.

Ключові обмеження Azure AI Vision:

- потреба у постійному мережевому з'єднанні для забезпечення коректного функціонування системи, що в окремих умовах може обмежувати її практичну доцільність;

- притаманні хмарним обчислювальним сервісам ризики, пов'язані із захистом інформації та обробленням персональних даних користувачів.

Приклад роботи Azure AI Computer Vision Model наведено на рис. 1.6.

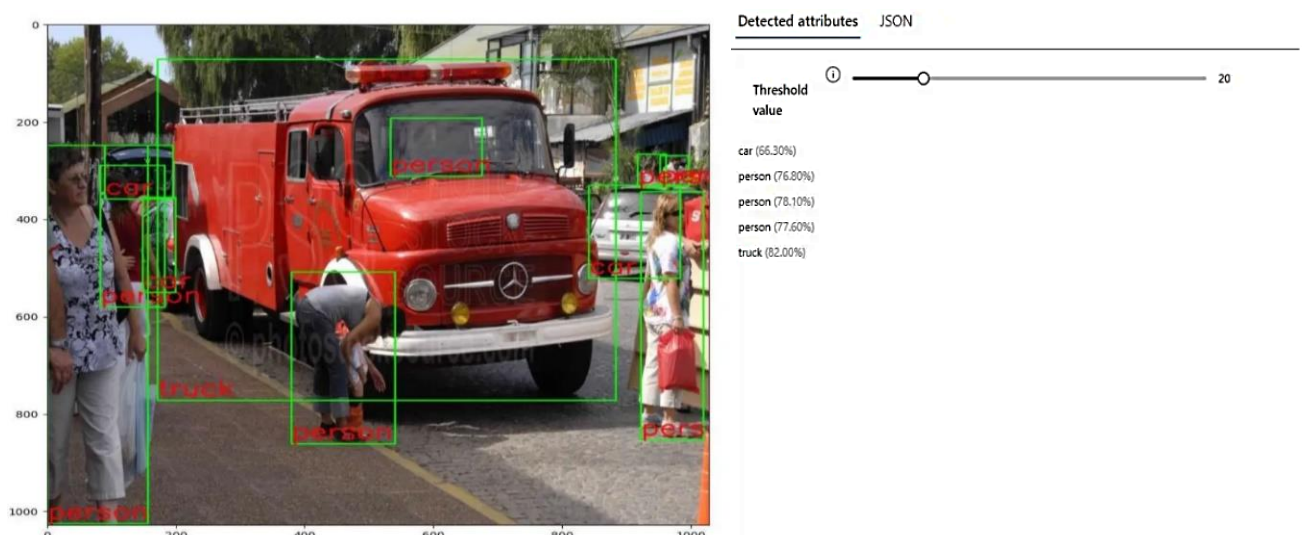


Рисунок 1.6 – Приклад роботи Azure AI Computer Vision Model [22]

Одним із найпоширеніших інформаційних сервісів, що забезпечує доступ до детальних відомостей про маршрути та зупинки громадського транспорту

у 73 містах України, зокрема в Києві, Харкові та Миколаєві, а також у низці інших держав (Молдова, Болгарія, Узбекистан, Сербія, Хорватія, Казахстан, Польща, Греція і Туреччина та ін.), є застосунок EasyWay. Даний сервіс функціонує у вигляді вебплатформи та мобільних застосунків для операційних систем Android, iOS і Windows Phone (рис. 1.7), а також надає програмний інтерфейс доступу (API) для інтеграції з зовнішніми системами [23].

До основних функціональних переваг сервісу EasyWay можна віднести:

- наявність ергономічного та інтуїтивно зрозумілого користувацького інтерфейсу, що забезпечує швидкий доступ до інформації про функціонування громадського транспорту та спрощує процедуру формування маршрутів пересування;

- можливість отримання оперативно оновлюваних даних щодо розкладів руху МПТ в режимі реального часу;

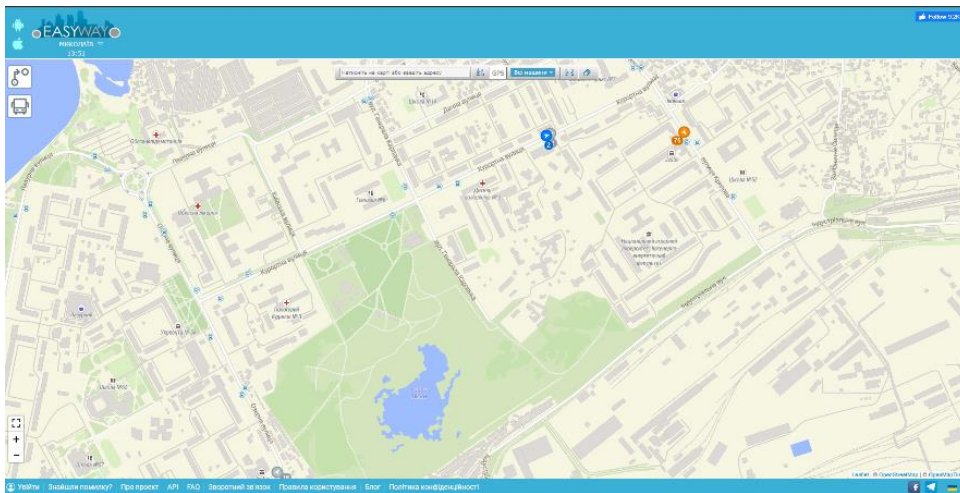
- широкий спектр прикладних можливостей, який включає навігаційні сервіси, підтримку ідентифікації та актуалізації маршрутної інфраструктури, а також допоміжні інструменти, орієнтовані на підвищення зручності користування МПТ;

- використання картографічних і навігаційних рішень провідних постачальників, зокрема Google та Here, у межах партнерської взаємодії.

Обмеження сервісу EasyWay:

- реалізація окремих функціональних можливостей системи EasyWay може потребувати безперервного доступу до мережі Інтернет, що є проблематичним у районах із обмеженою мережевою інфраструктурою;

- підтримання належного рівня актуальності та результативності функціонування EasyWay передбачає необхідність систематичного оновлення програмних і інформаційних компонентів, оскільки за їх відсутності дані можуть втрачати релевантність, зокрема в умовах впровадження нових маршрутів або коригування розкладів руху транспорту.



а)



б)

Рисунок 1.7 – Інтерфейси десктопного (а) та мобільного (б) застосунку EasyWay [23]

Ефективним засобом для виконання аналітичних процедур є сервіс Amazon Rekognition [24], що входить до складу платформи Amazon Web Services (AWS) та забезпечує функціонал розпізнавання облич, ідентифікації об'єктів, виявлення текстових фрагментів і реалізацію інших задач цифрового оброблення зображень. Визначальною перевагою Amazon Rekognition виступає можливість гнучкого масштабування відповідно до параметрів міської інфраструктури та кількості зупинкових пунктів, а також підвищена надійність функціонування, обумовлена використанням хмарної екосистеми AWS.

Водночас слід зауважити, що завдання планування міських транспортних перевезень *не потребує* розпізнавання облич, що вимагає значних обчислювальних ресурсів. З огляду на це можна зробити висновок, що використання сервісів AWS для досягнення мети даної роботи є надмірним. Додатково варто враховувати, що сервіси AWS здійснюють збір і обробку значних обсягів даних, зокрема зображень, що можуть містити персональну інформацію. Це, своєю чергою, загрожує конфіденційності та безпеці даних.

Безкоштовний застосунок **All Aboard**, який потребує менших обчислювальних потужностей, набуває поширення у США, Канаді, Великій Британії та Німеччині [25]. Використана в ньому глибока нейронна мережа здатна працювати в режимі реального часу та забезпечує розпізнавання знаків

автобусних зупинок, ідентифікацію автобусів і визначення конкретного рейсу. Цей проєкт отримав грант Microsoft AI for Accessibility.

Отже, представлене дослідження характеризується високою актуальністю та може розглядатися як ресурсоефективний підхід з позицій мінімізації використання обчислювальних потужностей.

В табл. 1.1 приведено порівняння розглянутих систем.

Сучасні наукові підходи дають змогу результативно виявляти локальні закономірності колективної динаміки та підвищувати точність сегментації потоків натовпу в сценах із високою щільністю скупчення людей [26; 27]. Представлення траєкторій руху в натовпі за допомогою CNN-моделі формалізується у вигляді кортежу, який надалі застосовується для кластеризації траєкторних даних. Процес обробки зображення для аналізу властивостей натовпу наведений на рис. 1.8.

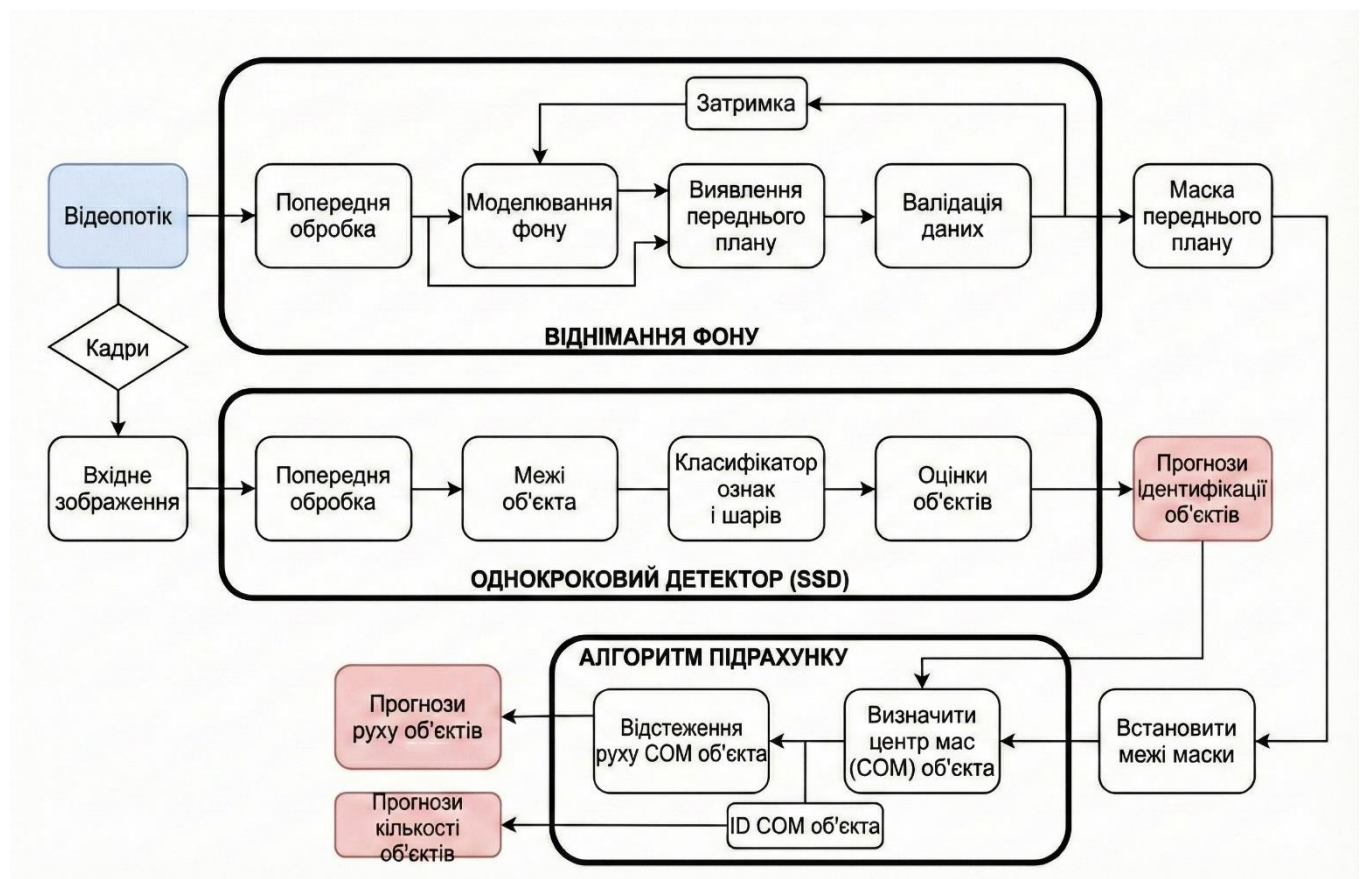


Рисунок 1.8 – Функціональна схема процесу обробки зображення для аналізу властивостей натовпу [сформовано автором на основі [26]]

Таблиця 1.1 – Порівняння систем виявлення людей на зображеннях

Показники	Azure AI Vision	EasyWay	Amazon Rekognition	All Aboard
Функціональність	+	+	+	+
Застосування	+	+	+	+
Легкість використання	—	+	-	+
Масштабованість	+	—	+	—
Вартість	—	+	—	+
Залежність від інтернет- з'єднання	+	+	+	+
Сумарний показник	4	5	4	5

Кожну кадр з відеопотоку натовпу обрізають до 25 % від його вихідного розміру. Обрізані кадри створюють чотири неперекриваючихся сегменти з кожного вихідного зображення. Застосування розглянутої моделі дозволяє досягти більш точного та стабільного розділення потоків натовпу (рис. 1.9). Водночас суттєвою обмежувальною умовою запропонованого підходу є необхідність дотримання принципу розривності та принципу подібності [28]. Перший із них передбачає, що сусідні сегменти зображення повинні відповідати різним об'єктам або різним частинам одного об'єкта, тобто межі сегментів мають бути чіткими та не перетинатися. Другий принцип вимагає, щоб пікселі всередині одного сегмента характеризувалися подібними ознаками, такими як колір, текстура або рівень яскравості; за дотримання цієї умови елементи з однаковими характеристиками будуть віднесені до одного сегмента.

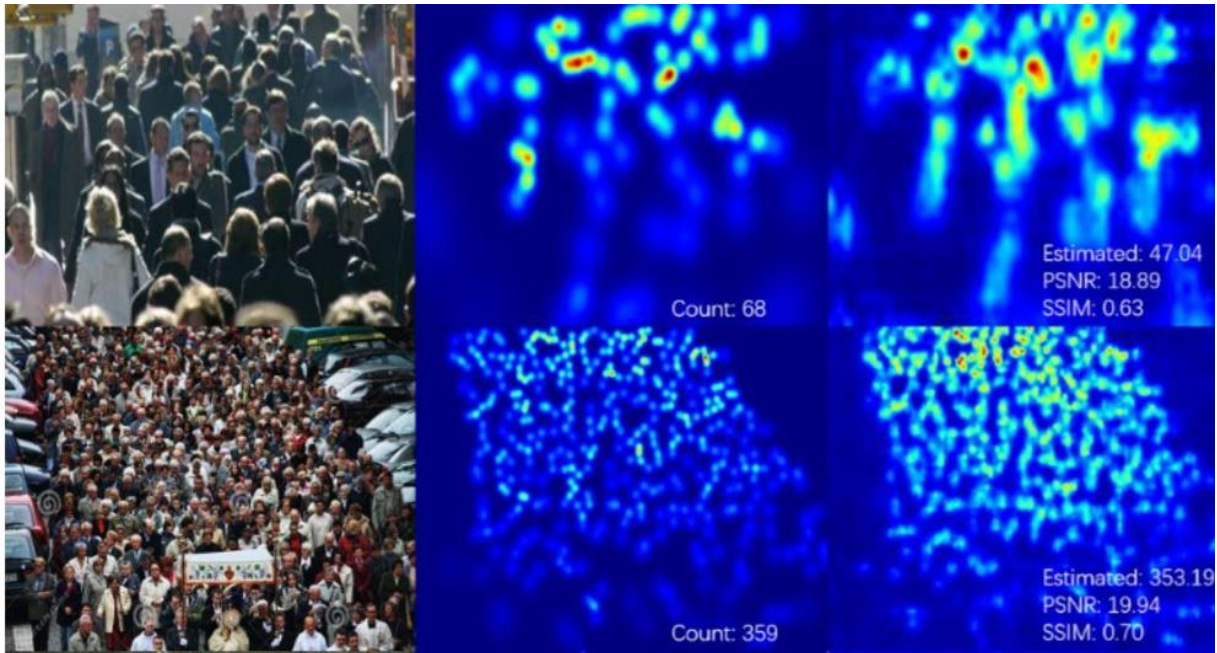


Рисунок 1.9 – Аналіз щільності натовпу шляхом сегментації зображення [27]

Автори дослідження [27] оцінюють середню абсолютну похибку (англ. Mean Absolute Error, MAE) 60,5 та середньоквадратичну похибку (англ. Mean Squared Error, MSE) 93,2. Результати дослідження [26] дають точність $> 92\%$ (MSE) при роботі з великою щільністю натовпу та нестабільними умовами зовнішнього освітлення. Випробування проводилися протягом типової тривалості посадки в автобус приблизно 20 секунд.

Результати функціонування застосунків, побудованих на основі запропонованої CNN-моделі, використовуються не лише для підрахунку кількості людей та оцінювання щільності натовпу, а й для виявлення аномальних поведінкових проявів, зокрема панічних реакцій, різких переміщень, формування скупчень, напрямів руху натовпу, ознак агресивної поведінки та інших нетипових ситуацій. Зазначається, що розроблене програмне рішення призначене для обробки відеопотоків із централізованого місця зберігання, що підходить для роботи в системах управління рівня «місто» та потребують обчислювальних ресурсів відповідної потужності.

В останні роки системи відеоспостереження на основі IP-камер отримали широке поширення серед правоохоронних та комунальних служб у межах концепції «розумного міста» для контролю за територіями, що становлять

особливий інтерес, включно з транспортною інфраструктурою [29]. Водночас, диспетчери змушені постійно моніторити відеостіни, на яких відображаються потоки даних з декількох камер одночасно (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Відображення відеопотоку з IP-камер у системі «розумного міста»

Основна відповідальність за ідентифікацію критичних ділянок і ухвалення управлінських рішень покладається на диспетчерський персонал, у зв'язку з чим впровадження автоматизованого опрацювання даних систем відеоспостереження здатне істотно зменшити когнітивне навантаження на оператора та мінімізувати ризик виникнення помилок, спричинених надмірною концентрацією уваги.

Ще однією актуальною проблемою є значна тривалість обробки великих обсягів відеоданих, що знижує оперативність та ефективність прийняття рішень щодо забезпечення населення якісними комунальними послугами, зокрема міським транспортом. Сучасні технології штучного інтелекту та нейронних мереж виступають ключовим драйвером розвитку концепції «розумного міста». Використання інтелектуальної відеоаналітики та експертних систем дозволяє класифікувати стан транспортних зупинок як нормальний або перенавантажений, що суттєво скорочує час обробки даних із годин до декількох хвилин, забезпечує швидке реагування персоналу та своєчасне направлення додаткового транспорту

на маршрути для оптимізації пасажиропотоку. Але слід дотримуватися балансу між впровадженням централізованих проєктів для прийняття стратегічних рішень та економних моделей, програмного забезпечення та апаратних рішень з низькими вимогами до ресурсів та енергоспоживання для прийняття поточних рішень на локальних ділянках «розумного міста».

1.3 Сучасні інформаційні технології у сфері організації міських пасажироперевезень

В умовах зміни ціннісних імперативів на ринку обслуговування соціально-економічних потреб населення, об'єктивного існування ризиків та пов'язаних з ними витратами, існує нагальна необхідність в ціннісно-орієнтованому управлінні бізнес-процесами, пов'язаними з впровадженням інноваційних ІТ-технологій [30]. Синергетичний ефект поєднання технологічних досягнень з соціальними потребами призводить до більш сталого та придатного для життя міського середовища. Дослідження проєктів розвитку «розумного міста» у Києві та Бучі ілюструють практичне застосування та переваги таких підходів, включаючи зниження витрат, прискорення термінів, підвищення точності та покращення адаптивності до непередбачених збоїв [31].

Управління інноваційними проєктами та продуктами в умовах нестабільного та турбулентного середовища, що описується фреймворком BANI (Brittle, Anxious, Nonlinear, Incomprehensible), є надзвичайно актуальним як для України, так і для інших країн [32; 33]. Актуальність досліджень у цьому напрямку зростає з огляду на необхідність застосування адаптивних методів і інструментів, здатних трансформувати невизначеність у стратегічну конкурентну перевагу, особливо з урахуванням швидкого розвитку сучасних технологій [34]. В таких дослідженнях побудова нечітких ієрархічних моделей важлива для визначення впливу параметрів оточуючого середовища (освітленість, сезон року тощо) та когнітивних параметрів (ступень втоми, рівень стресу, час прийняття рішення та ін.) осіб, що приймають рішення, на процес прийняття рішень [35].

Суттєвим важелем в управлінні такими проектами може стати багатокритеріальний аналіз даних з систем моніторингу реального часу на базі IoT-пристроїв, інтегрованих у комп'ютерну систему «розумного міста». Математична модель, призначена для оцінки та управління ризиками й потенційними можливостями інноваційних проектів у умовах нестабільного та турбулентного середовища, має включати оцінку ймовірностей, вплив ризиків і можливостей та їх інтеграцію в загальну функцію оптимізації, мати ознаки адаптації до постійної невизначеності та швидких змін. Доцільним є також розробка нечітких моделей, заснованих на теорії експертного оцінювання для порівняння параметрів об'єктів (наприклад комфортності ТЗ, року випуску, останньої дати ремонту й ін.). Методи вирішення проблем підвищення функціональної стійкості та ефективності оперативного управління режимами роботи системи МПТ потребують подальшого розвитку у зв'язку з впровадженням комплексу сучасних засобів моніторингу, оцінки та аналізу та прийняття відповідних рішень [36].

Особливої актуальності це набуває при розвитку проекту з організації пасажирських перевезень міським автомобільним транспортом у складі серії з набору проектів створення «розумного міста» – як одного з найважливіших для міста напрямків розумної трансформації [37; 38].

В роботі [39] наведено дослідження щодо визначення підходів до мінімізації витрат проекту з використанням подвійних задач. Подальший розвиток викладеного методу полягає у дослідженнях щодо виведення на маршрути пасажироперевезень ТЗ з різними характеристиками (місткість, рівень комфорту, можливість інклюзії й т. ін.).

До того ж, для ефективної роботи моделі обробки інформації в зазначеній КС необхідно зонування (рознесення у просторі) при одночасному обслуговуванні кількома видами транспорту. У роботі [40] наведені результати досліджень впровадження додаткових зупинок МПТ через перенавантаження існуючих зупинок. У роботі визначено, що своєчасність подачі пасажирського

транспорту має забезпечувати добові витрати часу на переміщення, які для міст не повинні перевищувати меж у 50–90 хв.

Для забезпечення таких умов необхідно розроблення моделей діагностування інтерактивних комп'ютерних мереж на структурно-логічному рівні [41] для моніторингу наповненості зупинок МПТ, діагностування перенавантаженості існуючих зупинок та визначення верхньої межі їх наповненості. Зважаючи на те, що такі моделі мають відображати стан системи у реальному часі, необхідно здійснювати їх асерційну верифікацію [42].

Для вирішення проблеми часових затримок під час планування інтенсивності транспортного потоку у роботі [43] розроблено моделі організації та регулювання дорожнього руху наповненості магістральних вулиць та доріг великих і найбільших міст. Зменшенню часових затримок у пасажироперевезеннях присвячені дослідження у роботі [44].

1.4 Обґрунтування необхідності проведення досліджень за обраною темою

З огляду на вищенаведене, необхідне комплексне розв'язання задач своєчасної подачі громадського транспорту за існуючими маршрутними системами залежно від наповнення зупинок пасажирями, що очікують ТЗ. Тому актуальним є розробка та вдосконалення методів збору і обробки інформації про пасажиропотоки, розроблення математичних моделей і програмного забезпечення (ПЗ) маршрутизації перевезень пасажирів на основі даних з інформаційно-вимірювальних мереж (ІВМ), інтегрованих в КС «розумного міста» (англ. Smart City), а також забезпечення доступу до інформації в умовах обмеженого енергоспоживання [45–48].

Однією з найбільш розгалужених комп'ютерних систем цього рівня є ІВМ, кінцевими хостами якої виступають ІР-камери, що здійснюють відеоспостереження на зупинках МПТ. Однак, на даний час широкомасштабне запровадження підсистем КС «розумне місто» супроводжується обширним переліком невирішених задач, до яких, зокрема відноситься, експоненційне

зростання обсягів даних та відсутність загальноприйнятих підходів до формування засобів їх зберігання та аналітичного опрацювання. За такими умовами необхідно розробити методи та алгоритми формування, оброблення та використання зображень з системи відеоспостереження на сервери обробки даних централізованих та локальних диспетчерських пунктів підсистеми МПТ.

Вивчення засад організації та функціонування підсистеми МПТ показало, що перспективним напрямом дослідження є застосовування підходу, який базується на аналізі характеристик зображень з ІР-камер ІВМ «розумного міста» без явної детекції окремих осіб. Основна ідея полягає в оцінюванні не кількості людей як такої, а рівня інформаційної складності сцени, яка корелює з фактичною наповненістю зупинки пасажирями. Такий підхід має ряд переваг (здатність працювати за поганої видимості, невеликі потреби в обладнанні, доступна вартість впровадження), проте, необхідно брати до уваги сприйнятливність відповідної ІКТ до шумів на зображеннях, що аналізуються, параметрів оточуючого середовища та невеликий діапазон дії.

Сучасні методи оцінювання наповненості сцен умовно можна поділити на кілька груп: методи прямого підрахунку об'єктів, методи щільнісної оцінки та непрямі статистичні методи.

Методи прямого підрахунку спираються на виявлення та трекінг окремих індивідуумів у відеокадрі. До цієї категорії відносяться алгоритми на основі згорткових нейронних мереж, таких як YOLO, SSD, Faster R-CNN та інші. Ключовою перевагою таких підходів є здатність забезпечувати точну кількість виявлених об'єктів, проте вони характеризуються високою обчислювальною складністю та потребують процесу навчання.

Методи щільнісної оцінки ґрунтуються на формуванні карт щільності, що апроксимують розподіл людей у просторі сцени. Такі підходи демонструють підвищену стійкість до часткових перекриттів (оклюзій), однак також відзначаються значними вимогами до обчислювальних ресурсів.

Тому доцільно у подальшому використовувати в даній роботі непрямі методи, які оцінюють наповненість сцени через інтегральні характеристики

зображення. Вони не забезпечують точного підрахунку людей, але є значно простішими з точки зору реалізації та обчислювальної складності.

Для забезпечення таких умов нові розроблювані алгоритми обробки зображень в ІВМ моніторингу наповненості зупинок пасажирського транспорту мають також діагностувати перенавантаженість існуючих зупинок та визначати верхню межу їх наповненості. Вищенаведені підходи потребують подальшої експериментальної перевірки шляхом проведення імітаційного та/або натурного експерименту на вибраних об'єктах з визначенням межі навантаженості кожної зупинки. В такому сенсі перспективним можна вважати дослідження методів визначення рівня (відсотку) наповненості пасажирами зупинок міського транспорту на основі бінаризації зображень із ІР-камер системи відеоспостереження у складі Smart City.

Оцінювання наповненості зупинок міського автотранспорту дозволить оптимізувати маршрути, інтервали руху та підвищити якість обслуговування пасажирів. Для цього має бути проведене експертне оцінювання (ЕО), в результаті якого приймається рішення щодо подачі ТЗ з певними характеристиками на визначений в результаті ЕО маршрут.

При здійсненні обробки інформації в комп'ютерних системах, призначених для автоматизації подачі міського транспорту на основі аналізу наповненості зупинок пасажирами, однією з основних проблем є визначення номерів маршрутів автотранспорту, на які потрібне першочергове подання ТЗ. В такому разі рішення задачі вибору ТЗ для логістичного забезпечення мультимодальних перевезень пасажирів виконується в умовах невизначеності та нечіткості вихідних даних. Це пояснюється тим, що на підставі визначення рівня наповненості зупинки і навіть підрахунку кількості пасажирів на зупинках за допомогою зображень з ІР-камер комп'ютерної системи «розумне місто» не можна визначити, за яким саме маршрутом бажають переміщуватись пасажирів на кожній зупинці, і яка кількість людей потребує кожного з номерів маршрутів, що обслуговують аналізуєму зупинку.

З цього можна зробити висновок, що немає сенсу витрачати достатньо великі обчислювальні ресурси на обчислення точної кількості пасажирів на зупинці – достатньо визначити рівень наповненості зупинки людьми для прийняття рішення щодо подачі ТЗ за маршрутами, які передбачені на певній зупинці.

Візуалізація отриманих результатів на вебінтерфейсі надасть операторам підсистеми МПТ зручний інструментарій для оцінки завантаженості зупинки МПТ та подальшого керування процесами регулювання пасажиропотоку

Для чіткого визначення номерів маршруток у більшості міст України, де розгорнуто КС «розумне місто», територіально розносять зупинки електротранспорту (тролейбусів) та маршруток за номерами – на відстань огляду з ІР-камер (приблизно до 20–50 м). До того ж в умовах невизначеності та нечіткості вихідних даних мають бути визначені номери маршруток для подачі таким чином, щоб розвантаження зупинок здійснювалося рівномірно на протязі всього маршруту певного номеру. Ситуація ускладнюється тим, що:

- по-перше, довжина маршрутів міського автотранспорту суттєво різниться – від 15 км до 30 км [49];
- по-друге, не на всіх зупинках на теперішній час встановлено ІР-камери, оскільки навіть в обласних центрах України концепція «розумне місто» тільки набуває свого розвитку [50; 51];
- по-третє, зупинки міського автотранспорту знаходяться у різних адмінрайонах міста та обслуговуються різними транспортними компаніями. Тобто, рішення про місткість та номер маршруту автотранспорту буде прийматися диспетчерами різних районів та/або різних перевізників.

Таким чином, поставлену задачу можна класифікувати як таку, що може бути вирішена із використанням математичного апарату групових експертних оцінок (ЕО) на основі метрик теорії свідочств [52–54].

Дослідження групових експертних оцінок (ЕО) має на меті передусім встановлення рівня їхньої конкордації (узгодженості). Саме на основі цього показника базується процес прийняття спільних управлінських рішень,

що координують дії диспетчерських служб адміністративних районів та автоперевізників стосовно розподілу транспортних засобів відповідно до реального пасажиропотоку. Водночас, на практиці нерідко виникають ситуації, коли судження окремих експертів суттєво дисонують із позицією більшості. Наявність таких аномальних відхилень у загальному масиві даних порушує однорідність вибірки та ускладнює отримання об'єктивного групового висновку.

З огляду на окреслену проблематику, доцільно виокремити чотири ключові завдання для подальшого наукового пошуку:

1) розробити математичні моделі аналізу RGB-зображень з IP-камер IBM КС «розумне місто»;

2) розробити математичні моделі оптимізованого енергоспоживання IoT-пристроями зі збільшенням часу енергонезалежності для роботи у локальних диспетчерських пунктах перевізників та з можливістю переключення обладнання IBM на зупинках на альтернативні джерела живлення у складних умовах енергопостачання;

3) розробити моделі прийняття групових рішень щодо розподілу пасажирського транспорту в умовах багатокритеріальності та складних форм невизначеності при логістичному забезпечення мультимодальних пасажирських перевезень;

4) розробити програмне забезпечення оброблення та використання зображень з системи відеоспостереження КС «розумне місто» для своєчасної подачі громадського транспорту на існуючі маршрути МПТ залежно від рівня наповнення зупинок пасажирями;

Результати досліджень у сукупності мають сформувати інформаційно-комп'ютерну технологію (ІКТ), яка поєднує апаратні засоби інтелектуального відеомоніторингу КС «розумне місто» з інтегрованими в її інфраструктуру IoT-пристроями кінцевих користувачів (диспетчерів та експертів у сфері МПТ). Зазначена ІКТ базується на сукупності розроблених методів, моделей та програмного забезпечення для отримання, оброблення, зберігання, передавання й управління інформацією, що надходить з IBM КС «розумне місто»

у реальному часі. Реалізація такої технології забезпечує підтримку ефективного формування та ухвалення консолідованих управлінських рішень щодо диспетчеризації пасажирських транспортних засобів з урахуванням факторів невизначеності та нечіткості вхідних даних.

Висновки до розділу 1

За результатами проведеного аналізу актуальності проблематики та рівня її опрацювання, що стосується виявлення людей і визначення ступеня наповненості просторових об'єктів на основі оброблення візуальних даних, сформульовано такі узагальнені висновки щодо основних напрямів дослідження:

1) стан розробленості питання. Науково-прикладні розробки протягом тривалого періоду були орієнтовані переважно на застосування сучасних інформаційних технологій для задач визначення місцеположення та ідентифікації окремих осіб або їх групи з використанням складних нейромережевих алгоритмів для розпізнавання облич. Необхідні дослідження, які здатні забезпечити вирішення поставлених задач в умовах обмежених обчислювальних ресурсів обладнання КС «розумне місто» та складних умовах енергоспоживання з аналізом функції енергонезалежності зазначеного обладнання;

2) сучасні інформаційні технології виявлення та обліку об'єктів у просторі. На теперішній час дослідниками велика увага приділяється можливостям IoT-пристроїв у складі КС «розумне місто» «розумного міста» для обліку пасажиропотоку. В ході аналізу існуючих трекінгових систем, які працюють у режимі реального часу, наголошено, що при використанні IoT-пристроїв у КС «розумне місто» необхідно враховувати їх обмежені апаратні ресурси, такі як малий обсяг пам'яті та необхідність мінімізації енергоспоживання;

3) теоретичні засади виявлення людей на зображеннях. У процесі дослідження специфіки задач детекції об'єктів проаналізовано основні переваги та обмеження методів машинного навчання й штучного інтелекту для виявлення та класифікації об'єктів на основі даних відеоспостереження, а також розглянуто сильні та слабкі сторони застосування різних типів нейронних мереж (CNN, RNN

тощо). Показано, що вирішення задачі оптимізації МТП в умовах розгортання розгалужених ІВМ КС «розумне місто» достатньо технологій комп'ютерного зору не тільки для виявлення людей, а також для оцінювання рівня наповненості ними певного простору (наприклад, зупинок пасажирського транспорту);

4) управління ризиками та потенційними можливостями інноваційних проєктів. Процес прийняття рішень при вирішенні не тільки стратегічних, але й поточних проблем організації функціонування підсистем «розумного міста» (зокрема й транспортної підсистеми пасажирських перевезень), які розвиваються у турбулентному оточенні, має включати оцінку ймовірностей, вплив ризиків і можливостей та їх інтеграцію в загальну функцію оптимізації, мати ознаки адаптації до постійної невизначеності та швидких змін. Доцільним є розробка нечітких моделей, заснованих на теорії експертного оцінювання для порівняння параметрів об'єктів, – якими у підсистемі МПТ виступають транспортні засоби (наприклад комфортності ТЗ, року випуску, останньої дати ремонту й т. ін.) – для формування груп експертів, здатних прийняти агреговані рішення в умовах багатокритеріальності та складних форм невизначеності.

Отже, у цьому розділі здійснено обґрунтування цільової спрямованості роботи, визначено коло завдань і описано підхід до виконання досліджень, результати яких наведено в подальших розділах.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [45–48].

Список використаних джерел до розділу 1

1. Russo F., Rindone C. European Smart City and urban transport. *In book: Information and Communications Technologies for Smart Cities and Societies. The City Project*. Vol. 5. Springer, Cham, 2024. P. 91–104. DOI: 10.1007/978-3-031-39446-1_7.
2. Маркевич К., Сіденко В. Smart-інфраструктура у сталому розвитку міст: Світовий досвід та перспективи України. Київ : Центр Разумкова; Заповіт, 2021. 400 с. URL: <https://razumkov.org.ua/uploads/other/2021-SMART-%D0%A1YTI-SITE.pdf> (дата звернення: 14.04.2024).

3. Russo F., Rindone C. Smart City for sustainable development: Applied processes from SUMP to MaaS at European level. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, Is. 3. no. 1773. 18 p. DOI: 10.3390/app13031773.
4. Alii H. M., Paranthaman P., Fay F., Muthusundari S., et al. Passive measurement techniques for IoT device behavior on the Internet. November 2025 *Journal of Internet Services and Information Security*. 2025. Vol. 15, Is. 4. P. 102–112. DOI: 10.58346/JISIS.2025.I4.008.
5. Xu X., Che X., Xianqiu Meng X., Li L., et al. WiPIHT: A WiFi-based position-independent passive indoor human tracking system. *Sensors*. 2025. Vol. 25, Is. 13, no. 3936. 29 p. DOI: 10.3390/s25133936.
6. Jimoh, A. A, Nafiu A. S., Oladuntoye Q. O, & Mafe A. S. Development and implementation of Internet of Things based vehicle tracking system. *Journal of Engineering Research and Development*. 2025. Vol. 9, Is. 5. DOI: 10.70382/bejerd.v9i5.013.
7. Chandel T. A., Kidwai M. U. IoT based Smart Cities with intelligent transportation systems for sustainable future. *International Journal of Science, Mathematics and Technology Learning*. 2025. Vol. 33, No. 1. P. 1124–1139. DOI: 10.5281/zenodo.15516865/
8. Gade S. A., Pandit R.B., Kalpesh P., Tanveer P., et al. Real-time tracking system for city bus location and passenger count. *International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology*. 2024. DOI: 10.48175/IJARSCT-22155.
9. Boreiko O., Teslyuk V., Kryvinska N., Logoyda M. Structure model and means of a smart public transport system. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 155. P. 75–82. DOI: 10.1016/j.procs.2019.08.014.
10. Ignacio J. B. B., Millo M. P., Vicente R., Tennom J. M. A. Development of an Internet of Things (IoT)-based real-time public transport passenger tracking system. *Isabela State University Linker Journal of Engineering Computing and Technology*. 2026. Vol. 2, Is. 2, no. 39. DOI: 10.65141/ject.v2i2.n3.

11. Мацелюх Ю. Р., Бублик М. І., Висоцька В. А. Інтелектуальна система динамічної 2D-візуалізації пасажиропотоків маршрутів громадського транспорту. *Інформаційні системи та мережі*. 2022. № 12. С. 79–119. DOI: 10.23939/sisn2022.12.079.

12. Danchenko O., Inna Rozlomii I., Yarmilko A., Naumenko S. A lightweight secure boot mechanism for protecting the firmware of IoT devices. *Ceur Workshop Proceedings*. 2025. Vol. 4048. P. 240–250. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4048/paper19.pdf> (Last accessed: 12.10.2025).

13. Pineda-Jaramillo J., Barrera-Jiménez H., MesaArango R. Unveiling the relevance of traffic enforcement cameras on the severity of vehicle–pedestrian collisions in an urban environment with machine learning models. *Journal of Safety Research*. 2022. Vol. 81. P. 225–238. DOI: 10.1016/j.jsr.2022.02.014.

14. Marczyk M., Kempski A., Socha M., Cogiel M., et al. Passenger location estimation in public transport: Evaluating methods and camera placement impact. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2024. Vol. 99. P. 1–10. DOI: 10.1109/TITS.2024.3434746.

15. Patil B. D., Praveen R., Rambhatla A. K., Trakroo K., Singh K., Vishanth R. Graph neural network model for intelligent urban traffic flow prediction and Smart City mobility management. *2025 2nd International Conference on Intelligent Algorithms for Computational Intelligence Systems (IACIS)*, Hassan, India, 2025, P. 1–6. DOI: 10.1109/IACIS65746.2025.11211237.

16. Rahajoe A., Suriansyah M., & Jr A. Hybrid neural network-based road damage detection using CNN-RNN and CNN-MLP models. *Jurnal Teknik Informatika (Jutif)*. 2025. Vol. 6. DOI: 1217-1228. 10.52436/1.jutif.2025.6.3.4435.

17. Durluk I., Tymoteusz Miller T., Kostecka E., Pusty T., Łobodzińska A. Utilizing recurrent neural networks in sustainable urban transport and logistics. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*. 2024. No. 78 (150). P. 131–149. DOI: 10.17402/609.

18. Niu X., Zhu Yi., Zhang X. DeepSense: A novel learning mechanism for traffic prediction with taxi GPS traces. *Proc. of the Symposium on Selected Areas in*

Communications: GC14 SAC Internet of Things (Globecom). 2014. P. 2805–2810. DOI: 10.1109/GLOCOM.2014.7037223.

19. Rendón W. D. M., Anillo C. B., Jaramillo-Ramirez D., Carrillo H. Passenger counting in mass public transport systems using computer vision and deep learning. *IEEE Latin America Transactions*. 2023. Vol. 21, No. 4. P. 537–545. URL: <https://latamt.ieee9.org/index.php/transactions/article/view/7331/1848> (Last accessed: 12.10.2025).

20. Zhang Y., Zhou D., Chen S., Gao S., Ma Y. Single-image crowd counting via multi-column Convolutional Neural Network. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016. P. 589–597. DOI: 10.1109/CVPR.2016.70.

21. Movaghar M., Jenelius E., Hunter D. Machine learning framework to estimate ridership loss in public transport during external crises: case study of bus network in Stockholm. *European Transport Research Review*. 2025. Vol. 17, Is. 1. 11 p. DOI: 10.1186/s12544-025-00722-z.

22. Raulji Yu. Object detection for real-time visual understanding. Publ. March 15, 2024. URL: <https://prakashinfotech.com/object-detection-for-real-time-visual-understanding> (Last accessed: 07.08.2025).

23. EasyWay : web site. URL: <https://www.eway.in.ua/ua/cities/mykolaiv> (Last accessed: 07.08.2025).

24. Amazon Rekognition: Developer Guide. Detecting objects and concepts. Amazon Web Services, Inc., 2025. 1140 p. URL: <https://docs.aws.amazon.com/pdfs/rekognition/latest/dg/rekognition-dg.pdf#labels> (Last accessed: 07.08.2025).

25. Tanase I. All Aboard – an AI based mobile app is making bus stops more accessible. Publ. Apr 22, 2022. URL: <https://blogs.microsoft.com/accessibility/all-aboard-an-ai-based-mobile-app-is-making-bus-stops-more-accessible/> (Last accessed: 07.08.2025).

26. Cheong K. H., Poeschmann S., Lai J. W. Practical automated video analytics for crowd monitoring and counting. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 182608–182618. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2958255.

27. Dobryshev R. Y., Maksymov M. V. Accurate crowd counting for intelligent video surveillance systems. *Herald of Advanced Information Technology*. 2024; Vol. 7, No. 3. P. 253–261. DOI: 10.15276/hait.07.2024.17.

28. Yang C., Guo H. A Lightweight semantic segmentation algorithm based on deep convolutional neural networks. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022. Vol. 2022, Article ID 5339664. 9 p. DOI: 10.1155/2022/5339664.

29. По Миколаєву збираються облаштувати 270 ділянок відеонагляду: на реалізацію проєкта витратять €70 млн / Ю. Ткач. Опубл. 27 липня 2023 р. URL: <https://nikvesti.com/news/politics/273485> (дата звернення: 12.10.2025).

30. Shameli S. M., Azar E. R. Computer vision-based generating and updating of the public transit bus stop inventories. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*. 2022. Vol. 1, is. 2, no. 100016. DOI: 10.1016/j.iintel.2022.100016.

31. Murovansky G., Bushuyeva N. Proactive management of smart development projects in a turbulent environment. *Management of Development of Complex Systems*. 2025. Vol. 62. P. 24–31, DOI: 10.32347/2412-9933.2025.62.24-31.

32. Bushuyev S., Tykchonovych J., Chernysh O., Sukhonos N., Khalilov A. Creative principles for managing innovation projects in BANI environment. *Management of Development of Complex Systems*. 2024. Vol. 57. P. 6–11. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.57.6-11.

33. Cascio J., Johansen B., Williams A. F. Navigating the Age of Chaos: A sense-making guide to a BANI world that doesn't make sense. Berrett-Koehler Publishers, 2025. 256 p.

34. Бушуєва Н., Лобок Є., Мурованський Г. Управління інноваційними проєктами та продуктами в умовах дигіталізації та турбулентного оточення. *Екологічна безпека та природокористування*. № 54 (2). С. 101–109. DOI: 10.32347/2411-4049.2025.2.101-109.

35. Perederyi V. I., Borchik E. Y., Zosimov V. V., Bulgakova O. S. Evaluation of the influence of environmental factors and cognitive parameters on the decision-making process in human-machine systems of critical application. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2024. № 1. P. 76–84. DOI: 10.15588/1607-3274-2024-1-7.

36. Perederyi V., Borchik E., Ohnieva O. Information technology for decision making support and monitoring in manmachine systems for managing complex technical objects of critical application. *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham, 2021. Vol. 1246. P. 448–466. DOI: 10.1007/978-3-030-54215-3_29.

37. Shameli S. M., Loroff B., Robert Jancev R., Borjian S., Azar E. R. Automated assessment of public transit bus stops using computer vision methods. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2023. Vol. 37, is. 5. DOI: 10.1061/JCCEE5.CPENG-530.

38. Bushuyev S., Bushuyeva N., Onyshchenko S., Khodikova I. Smart Cities: Through projects to resist entropy. *IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS)*, Bilbao, Spain, 2022. P. 44–50. DOI: 10.1109/E-TEMS53558.2022.9944516.

39. Chernov S., Titov S., Chernova L., Kunanets N., Chernova L. Determination of approaches for project costs minimization with use of dual problems. *Econtechmod : an international quarterly journal / Polish Academy of Sciences*. 2019. Vol. 08, No. 2. P. 61–68. URL: <https://bibliotekanauki.pl/articles/410624.pdf> (Last accessed: 21.10.2025).

40. Войтович О. А., Ткач В. О., Луб'яний П. В. Модель впровадження додаткових зупинок міського пасажирського транспорту. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Інженерні науки*. 2020. Т. 4, № 75. С. 20–27. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2020.4.2.

41. Мірошник М. А., Кулак Е. М., Філіпенко О. І., Шафранський А. В. Моделі діагностування інтерактивних комп'ютерних мереж на структурно-логічному рівні. *Вісник Національного технічного університету" ХПІ". Серія:*

Інформатика і моделювання. 2025. Т. 1, Вип. 2 (14). С. 130–142. DOI: 10.20998/2411-0558.2025.02.09.

42. Мірошник М. А., Пахомов Ю. В., Пшеничний К. Ю., Шафранський А. В. Асерційна верифікація моделей пристроїв реального часу з недетермінованими зовнішніми подіями. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. Том 29, № 1 (156). С. 37–44. DOI: 10.18664/ikszt.v29i1.300988.

43. Bielecka O., Liubiy Y., Ocheretenko S., Muzylyov D., Ivanov V., Pavlenko I. Approach to determine transport delays at unsignalized intersections. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2023. Vol. 25, no. 3. P. A124–A136. DOI: 10.26552/com.C.2023.052.

44. Royko Yu., Yevchuk Yu., Bura R., Velhan A. Minimization of public transport delays at arterial streets with coordinated motion. *Transport Technologies*. 2022. Vol. 3, no. 1. P. 14–29. DOI: 10.23939/tt2022.01.014.

45. Буренко В. О. Моделювання подачі та завантаження міського транспорту на основі даних системи «Розумне місто». *Ольвійський форум – 2025: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі* : тези доп. XXII Міжнар. наук. конф., Миколаїв, 16–21 черв. 2025 р. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2025. С. 52–55. DOI: <https://doi.org/10.34132/mspc2025.01.06.09>.

46. Буренко В. О. Використання технології Інтернету речей для підрахування людей на зупинках міського транспорту у системі «розумне місто». *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг (MSIE-2024)* : тези доп. VIII Міжнар. наук.-практ. конф. / Київ. нац. ун-т технологій та дизайну, Київ, 07 листопада 2024 р. Київ, 2024. С. 187–188. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/28607/1/Mechatronic%20systems_MSIE%202024.pdf (дата звернення: 27.03.2025).

47. Буренко В. О., Гусєва-Божаткіна В. А. Обробка інформації з комп'ютерної системи «розумне місто» для подачі евакотранспорту в умовах воєнного стану. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : тези доп. XV Міжнар. наук.-техн. конф. / Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, 26–27 вересня 2024 р. Миколаїв : НУК, 2024. С. 602–605. URL:

<https://rep.nuos.edu.ua/server/api/core/bitstreams/59e5722f-538b-450b-ad94-7316f21bfbfb/content> (дата звернення: 01.11.2024).

48. Буренко В. О. Алгоритми обробки зображень в інформаційно-вимірювальній мережі моніторингу наповненості зупинок пасажирського транспорту. *Інформаційні технології і автоматизація – 2023*: тези доп. XVI Міжнар. наук.-практ. конф. / Одес. нац. технолог. ун-т, Одеса, 19–20 жовтня 2023 р. Одеса : Вид-во ОНТУ, 2023. С. 35–37. URL: <https://ontu.edu.ua/itia> (дата звернення: 30.10.2024).

49. Актуальна інформація про громадський транспорт України. *EasyWay* : вебсайт. URL: <https://www.eway.in.ua/ua/cities/mykolaiv/routes> (дата звернення: 14.04.2024).

50. Маркевич К., Сіденко В. Smart-інфраструктура у сталому розвитку міст: Світовий досвід та перспективи України. Київ : Центр Разумкова; Заповіт, 2021. 400 с. URL: <https://razumkov.org.ua/uploads/other/2021-SMART-%D0%A1YTI-SITE.pdf> (дата звернення: 14.04.2024).

51. Мураєв Є. В. Український досвід впровадження концепції смарт-міст: основні досягнення та проблеми. *Вісник Хмельн. нац. ун-ту*. 2020. № 2. С. 91–96. DOI: 10.31891/2307-5740-2020-280-2-17.

52. Kovalenko I. I., Shved A. V. Clustering of group expert estimates based on measures in the theory of evidence. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016, № 4. С. 71–77.

53. Kovalenko I., Shved A. Development of a technology of structuring group expert judgments under various types of uncertainty. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 2018. № 3/4 (93). С. 60–68. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.133299.

54. Davydenko Ye. O., Shved A. V., Honcharova N. V. Development of technique for structuring of group expert assessments under uncertainty and inconcistency. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2023. № 4. P. 30–38. DOI: 10.15588/1607-3274-2023-4-3.

РОЗДІЛ 2

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА МЕРЕЖА КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ «РОЗУМНЕ МІСТО» ДЛЯ АНАЛІЗУ НАПОВНЕНOSTІ ЗУПИНОК ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Тема дослідження охоплює два основні напрямки: виявлення людей та оцінювання наповненості ними певного простору (в розглянутому випадку – зупинки міського транспорту) за допомогою обробки зображень, отриманих з IP-камер КС «розумне місто». Як було зазначено в попередньому розділі, універсальних інструментів, здатних забезпечити високий рівень ефективності для обох завдань одночасно, на сьогодні не існує. Тому у цьому розділі відповідні методи та підходи розглядаються окремо для кожного напрямку.

Розробка математичних моделей опрацювання даних в енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мережах (IBM) КС «розумне місто» забезпечує можливість автоматизованого здійснення моніторингу в режимі реального часу та підтримки планування бізнес-процесу подачі ТЗ на маршрути МПТ на основі аналізу інформації, що надходить з IP-камер. Застосування такої системи дає змогу накопичувати статистичні відомості щодо рівня наповненості зупинок пасажирами на різних маршрутах, що сприятиме підвищенню якості транспортного обслуговування населення та оптимізації руху МПТ.

Підрозділ 2.1 присвячений аналізу методів обробки зображень з IP-камер IBM КС «розумне місто», розглядається доцільність використання глобальних (порогових) та локальних (адаптивних) методів у різних умовах та особливості використання діаграм яскравості для аналізу сцен різної наповненості. В підрозділі 2.2 описано методи, визначення та математичні залежності, які використовуються при обробці та аналізі зображень з IP-камер, введено новітню термінологію та змінні для побудови зазначених математичних моделей. В підрозділі 2.3 наведені результати безпосереднього аналізу візуальних сцен на зупинках МПТ з різним рівнем наповненості пасажирами. Підрозділ 2.4 містить опис процесу розробки моделі енергоспоживання IoT-пристроїв як хостів IBM «розумне місто». В підрозділі 2.5 розглянуто особливості побудови

енергонезалежних ІВМ з організацією живлення ІР-камер на зупинках від альтернативних джерел живлення.

2.1 Методи обробки зображень з ІР-камер ІВМ КС «розумне місто»

З ІР-камер можуть надходити як повнокольорові, так і бінарні зображення – це залежить від етапу обробки та налаштувань ІВМ. У більшості випадків ІР-камери передають саме кольорове відео або кадри. В процесі подальшого алгоритмічного опрацювання кадрів (порогова обробка, сегментація, фонове віднімання) формуються бінарні представлення.

Існуючі різні методи бінаризації зображень можна умовно поділити на глобальні (порогові) та локальні (адаптивні). У загальному сенсі завдання виявлення об'єктів полягає у встановленні наявності на зображенні об'єкта, що має деякі певні характеристики. Такою характеристикою може бути, наприклад, яскравість зображення.

Локальні (адаптивні) методи бінаризації розбивають зображення на декілька областей, для кожної з яких необхідно обчислити поріг, ґрунтуючись на інформації про інтенсивність пікселів. Алгоритми даного класу передбачають розбиття зображення на блоки певного розміру, при цьому розмір блоку має бути мінімальним, але достатнім для збереження вихідних особливостей та деталей зображення. Однак при цьому блоки мають бути настільки більшими, щоб шуми впливали на результат мінімально. Найбільш популярними адаптивними методами бінаризації зображень є метод Ніблека, метод Бернсена, метод Ейквеля, метод Саувола та метод Крістіана [1].

Адаптивну бінаризацію можна рекомендувати у разі, якщо необхідно обробити напівтонові зображення невисокої якості. Однак, у разі неоднорідностей фону з низькою контрастністю можлива поява хибних об'єктів. Адаптивні способи та пристрої, що їх реалізують, добре підходять для застосувань з обмеженими обчислювальними можливостями та/або обмеженими доступними ресурсами, що використовуються для виконання обробки зображень [2].

Згідно з глобальними (пороговими) методами одним з способів виявлення об'єктів є вибір порога за яскравістю, або гранична класифікація (thresholding). Сенс такого порогу полягає в тому, щоб розділити зображення на світлий об'єкт (foreground) та темне тло (background). Тобто об'єкт – це сукупність тих пікселів, яскравість яких перевищує поріг ($I > T$), а тло — сукупність інших пікселів, яскравість яких нижче за поріг ($I < T$). Питання постає у тому, як обрати ключовий параметр – поріг T . Одним з найбільш популярних методів глобальної бінарizaції зображень є метод Оцу, запропонований японським вченим Нобуюкі Оцу в 1979 р. [3].

Алгоритм Оцу складається з таких основних кроків:

Крок 1. Розрахуйте гістограму інтенсивності зображення.

Крок 2. Розрахуйте загальну кількість пікселів у зображенні.

Крок 3. Для кожного значення порогу (від 0 до максимальної інтенсивності пікселів) розрахуйте вагу кожної частини зображення (до та після порогу), а також середні значення інтенсивності для кожної частини.

Крок 4. Для кожного значення порогу розрахуйте дисперсії кожної частини (відносно середнього значення інтенсивності кожної частини) та загальну внутрішньокласову дисперсію, використовуючи вагу кожної частини.

Крок 5. Знайдіть поріг, для якого міжкласова дисперсія максимальна.

Крок 6. Застосуйте отриманий поріг до зображення.

Недоліком методу Оцу можливість втрати дрібних деталей, але для визначення рівня наповненості зупинок без розпізнавання людей дрібні деталі не є важливими, тому для планування пасажироперевезень алгоритм Оцу дозволяє знайти оптимальний поріг для бінарizaції зображення. У цьому випадку він забезпечує точну та надійну бінарizaцію зображення, що допомагає покращити якість подальшої обробки зображення.

До того ж, у глобальних (порогових) методах бінарizaції визначені порогові значення застосовуються до піксельних значень градації сірого (Grayscale), щоб отримати набір двійкових піксельних значень [4]. Але сучасні системи відеоспостереження базуються на IP-камерах, які формують відеострім та/або

зображення у кольоровому форматі. Тому якщо ставиться задача зменшення розмірності та/або підвищення стійкості до змін освітлення при розробленні спеціалізованого ПЗ необхідно передбачити попередню конвертацію кольорових зображень, отриманих з IP-камер IBM KC Smart City, у напівтонові зображення (відтінки сірого).

Для подальшого аналізу зображення зазвичай формують діаграму яскравості – гістограму представлення розподілу тонів, що використовується для оцінювання розподілу пікселів за рівнями світла й тіні. Деякі графічні редактори та програми мають вбудовані засоби для побудови діаграми яскравості (Adobe Photoshop, GIMP, Adobe Photoshop Lightroom, Darktable та ін.) [5–7]. У реальних інтерфейсах зліва на діаграмі яскравості знаходяться пікселі для темних кольорів (0 – чорний) , праворуч – для світлих (255 – білий) , по вертикалі – кількість пікселів для кожного рівня яскравості (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Розподіл щільності пікселів на гістограмі яскравості для темних та світлих зображень

Слід зауважити, що в залежності від погодних умов якість отриманих кадрів може дуже відрізнятись один від одного. В такому разі перед формуванням діаграми яскравості необхідно застосувати до зображення один з алгоритмів покращення. До варіантів такого покращення входять покрокове лінійне розтягування, лінійне вирівнювання, глобальне вирівнювання гістограми, модифікація роздільної здатності тощо [8].

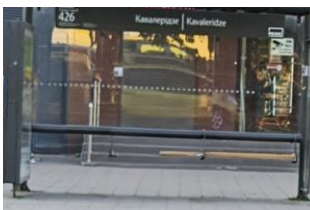
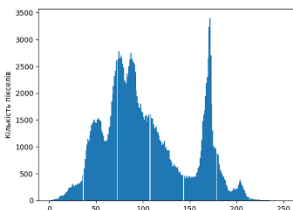
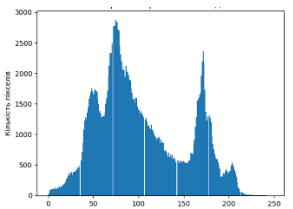
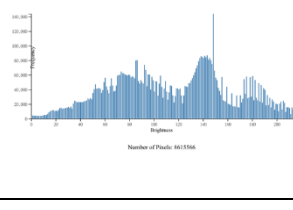
Загальна кількість пікселів на гістограмі може бути підрахована та використана для формулювання висновку, на якому з кадрів кількість людей

більша або менша [9; 10]. Таке спостереження базується на тому, що поява людей на кадрі:

- додає нові контрастні плями;
- змінює середні значення яскравості в локальних областях;
- може вносити «колірні сплески» (одяг, шкіра, сумки тощо).

В такому разі різниця гістограм відображатиме зміну загального розподілу яскравості/кольору і може бути використана для аналізу наповненості зупинки МПТ пасажирями, що очікують ТЗ (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Аналіз наповненості зупинки людьми за кількістю пікселів діаграми яскравості

№ з/п	Кадр з ІР-камери	Наявність людей на зупинці	Гістограма яскравості	Загальна кількість пікселів	Кількість кольорів
1		Без людей (малий простір)		5'689'798	40'483
2		Троє осіб (малий простір)		5'931'840	56'972
Кількісна різниця кадрів (1) та (2):				242 051	16 489
3		Троє осіб (великий простір)		8'615'566	н/в
Кількісна різниця кадрів (3) та (2):				2'683'726	н/в

Але слід зауважити, що результати такого аналізу будуть валідними лише за умови, коли кадри отримані:

- з одного ракурсу;

- при однаковому освітленні;
- IP-камерами з однаковими характеристиками/налаштуваннями.

З аналізу табл. 2.1 можна зауважити, що на фото з людьми (кадри 1 та 3):

- а) гістограма яскравості має більшу загальну кількість пікселів;
- б) кількість пікселів більше у середніх значеннях яскравості;
- в) на гістограмі з'являється «шум» і нерівності – це:
 - одяг;
 - обличчя;
 - дрібні деталі;
 - тіні від людей.

Але також слід враховувати, що результати будуть недостовірними, якщо підрахунок кількості пікселів буде виконуватися для гістограм кадрів, що відрізняються не кількістю людей, а розміром обстежуваного простору: на підставі суттєвого збільшення кількості пікселів на кадрі № 3 у порівнянні з кадром 2 не можна зробити висновок, що наповненість зупинки на кадрі № 3 більше ніж на кадрі № 2.

Таким чином, більш коректним буде висновок:

- а) діаграма яскравості не підходить для підрахунку людей;
- б) кількість пікселів можливо використовувати для оцінки «порожньо vs непорожньо» виключно для кадрів з однаковою роздільністю, які зроблені при однакових умовах освітлення та інших характеристик, що здатні спричинити додаткові шуми на зображенні.

В такому разі можна запропонувати більш розширений аналіз кадрів за такими напрямками:

- виконувати попередню нормалізацію кадрів за розміром зображення зупинки;
- підраховувати кількісні показники лише в межах «області інтересу» Ω , яка відповідає зоні очікування пасажирів (див. п. 1.2.4);
- побудувати для аналізу гістограму кольорів кадрів, отриманих з IP-камери;

- обчислити ентропію кольору;
- провести дослідження щодо можливості використання кількості унікальних кольорів у якості індикатора «складності сцени».

2.2 Математичні моделі аналізу RGB-зображень з IP-камер IBM КС «розумне місто»

Запронована математична модель сформульована у вигляді системи рівнянь для оцінювання наповненості зупинок на основі аналізу кадрів з IP-камер, яка не потребує застосування глибинних нейронних мереж. Такий підхід сприяє істотному зниженню обчислювальних витрат у процесі ухвалення рішень щодо подачі ТЗ на маршрут та спрощує вимоги до обчислювальних ресурсів пристроїв, якими оснащені диспетчери локальних маршрутів. Традиційні підходи до моделювання часто мають труднощі з обробкою величезних та складних наборів даних, що генеруються у КС сучасного «розумного міста».

Спочатку проводиться аналіз «сцени» як одиниці, яка складається з одного чи кількох кадрів із просторовою та/або часовою безперервністю, тому що одиночний кадр з IP-камери може не захопити всю зупинку й потрібна так звана «сцена» з взаємним перекриттям зроблених кадрів. Термін «сцена» в такому сенсі запозичений з галузі візуалізації 3D-даних (наприклад, візуальних середовищ програмування як от JavaFX, Blender, Scratch та ін.) [11–13], коли потрібний аналіз середовища, яке містить усі елементи (в розглянутому випадку – пасажирів на усьому просторі зупинки ТЗ), які потім мають бути включені в аналіз цільового простору.

2.2.1 Ентропійна характеристика сцени

Інформаційна складність сцени оцінюється за допомогою ентропії Шеннона [14]:

$$H(t) = - \sum_{i=0}^{255} p_i \log_2(p_i), \quad (2.1)$$

де p_i – імовірність появи рівня яскравості i у кадрі $G(t)$.

Ентропія Шеннона (англ. Shannon Entropy, SE) використовується як кількісна міра інформаційної складності зображення. Ентропія Шеннона є мірою невизначеності розподілу значень яскравості пікселів у кадрі. За відсутності людей сцена зупинки є відносно однорідною, що відповідає низькому значенню ентропії. Поява пасажирів у зоні зупинки спричиняє збільшення числа структурних елементів сцени, кількості контурів та варіативності текстур, що відображає більш складну просторову організацію сцени. Зі збільшенням чисельності людей на зупинці зростає різноманітність рівнів яскравості пікселів, що, у свою чергу, призводить до підвищення значення ентропії зображення – міри невизначеності та інформаційної насиченості сцени.

Таким чином, ентропія виступає кількісним показником складності та наповненості кадру пасажирями, що дозволяє більш об'єктивно оцінювати рівень наповненості зупинкового простору МПТ та інтегрувати цей параметр у системи аналізу пасажиропотоку.

Підсумовуючи вищенаведене, ентропійна характеристика може бути використана як індикатор наповненості сцени без необхідності виконання сегментації або класифікації об'єктів. За сучасними дослідженнями використання методу SE дозволяє приблизно на 50 % швидше обчислення, у порівнянні з обчисленням ентропії засобами пошуку у таблицях, зсувом бітів або послідовним наближенням [14]. Це також доводить доцільність застосування саме методу SE у якості індикатора наповненості сцени.

2.2.2 Контрастна складова

Для врахування локальних змін яскравості та текстурної насиченості сцени використовується стандартне відхилення яскравості пікселів зображення, яке будемо називати «контрастна складова» $\sigma(t)$:

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{|\Omega|} \sum_{(x; e) \in \Omega} (G_t(x; y) - \mu(t))^2}, \quad (2.2)$$

де $\mu(t)$ – середнє значення яскравості кадру.

Контрастна складова дозволяє врахувати локальні зміни структури сцени та диференціювати сцени з однаковою середньою яскравістю, але різною щільністю об'єктів. Контрастна складова є чутливою до появи нових об'єктів у полі зору камери. Високий рівень наповненості зупинки супроводжується зростанням контрасту через різноманітність одягу та форм об'єктів (діти, дорослі, худорляві, високі та ін.).

2.2.3 Міжкадрова відмінність

Для локалізації динамічних об'єктів (пасажирів) використовується різниця $D_{diff}(t)$ між поточним кадром та еталонним зображенням порожньої сцени:

$$D_{diff}(t) = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{(x; e) \in \Omega} |G_t(x; y) - G_{ref}(x; y)|. \quad (2.3)$$

Ця характеристика дозволяє визначити рухомі об'єкти та/або присутність людей без виконання складних процедур сегментації або детекції.

Джерела міжкадрової різниці та відповідні значення показника D_{diff} наведені у табл. 2.2.

Зважаючи на наведені у табл. 2.2 значення, можна зробити висновок, що релістичний коридор для порожньої сцени (зупинки без пасажирів):

$$D_{diff_без} \in [1 \dots 5]. \quad (2.4)$$

Таблиця 2.2 – Фізичне обґрунтування значень міжкадрової відмінності для порожньої сцени (без людей)

Джерело	Сенсорний шум	JPEG-компресія	Хмарка	Легкий блік	Великі тіні
Типове значення D_{diff}	0,3–1	0,5–1,5	1–3	2–4	3–6

На підставі (2.4) та табл. 2.2 можна вважати, що значення $D_{diff_без} < 1$ можна характеризувати як похибку у даних; при $D_{diff_без} > 5$ можна

діагностувати появу людей у кадрі. Значення (2.4) характеризують сцену без людей.

Наведений підхід дозволяє ефективно враховувати появу людей навіть за складних умов освітлення.

2.2.4 Інтегральний індекс наповненості кадру

На основі вищезазначених характеристик запропоновано ввести «інтегральний індекс наповненості кадру» (англ. Scene Fullness Index) $SFI(t)$:

$$SFI(t) = H(t) \times \sigma(t) \times D(t), \quad (2.5)$$

де $H(t)$ – ентропія. Є глобальною інформацією про зображення;

$\sigma(t)$ – контрастна складова. Містить інформацію про локальну текстурну структуру зображення;

$D(t)$ – міжкадрова різниця, наприклад, від порожньої сцени.

Інтегральний індекс наповненості кадру SFI представляє собою кількісну характеристику, яка відображає рівень наповненості зупинки МПТ у визначений момент часу t . Значення цього індексу формується як комбінована величина, що обчислюється як добуток трьох складових:

- **ентропії зображення**, що характеризує інформаційну насиченість сцени та ступінь її невизначеності;
- **контрастної складової**, яка визначає різницю між світловими рівнями пікселів і дозволяє оцінити наявність видимих об'єктів у кадрі;
- **міжкадрової різниці**, що відображає динамічні зміни сцени шляхом порівняння поточного кадру з попереднім (знімок порожньої зупинки без людей).

Така комбінація параметрів разом покриває три незалежних аспекти та забезпечує комплексну оцінку наповненості зупинки пасажирями, дозволяючи одночасно враховувати просторові, тональні та динамічні характеристики кадрів з IP-камер IBM КС «розумне місто» для більш точного та надійного аналізу пасажиропотоку.

2.2.5 Нормований індекс наповненості кадру

У процесі розроблення інтегрального індексу наповненості сцени $SFI(t)$ виникає необхідність приведення його абсолютних значень до уніфікованої шкали, зручної для інтерпретації оператором/диспетчером перевізника та подальшого автоматизованого аналізу. Оскільки абсолютні значення $SFI(t)$ залежать від умов освітлення, сцени та апаратних параметрів камери, пряме використання таких значень є недостатньо інформативним.

З цією метою у роботі використовується перцентильна нормалізація, що дозволяє сформувати статистично стійку шкалу без впливу одиничних аномальних значень.

Перцентильна нормалізація базується на визначенні максимального репрезентативного значення індексу наповненості за формулою:

$$SFI_{max} = P_{95}(SFI(t)), \quad (2.6)$$

де $P_{95}(SFI(t))$ – 95-й перцентиль вибірки значень $SFI(t)$, отриманих для сцен з наявністю пасажирів на етапі калібрування системи.

Використання перцентилі замість максимального значення забезпечує робастність шкали до викидів, викликаних шумами, відблисками, різкими змінами освітлення або іншими випадковими артефактами.

Нормоване значення індексу наповненості кадру визначається за формулою:

$$SFI_n(t) = \frac{SFI(t)}{SFI_{max}} \times 100. \quad (2.7)$$

На відміну від класичних підходів, у даній роботі не застосовується жорстке обмеження зверху значення 100 %. Таким чином формується відкрита шкала перевантаженості, у якій:

- а) $SFI_n(t) < 100 \%$ – сцена знаходиться у межах типової наповненості;
- б) $SFI_n(t) = 100 \%$ – сцена відповідає граничному типовому рівню наповненості;

в) $SFI_n(t) > 100\%$ – сцена характеризується перевищенням типової наповненості та інтерпретується як надперевантажена.

Значення $SFI_n(t)$ можуть перевищувати 100 %, що інтерпретується як перевищення типової максимальної наповненості, визначеної на калібрувальній вибірці (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Нормований індекс наповненості кадру для $SFI_{max} = 20'000$

$SFI(t)$	8'000	15'000	20'000	26'000	35'000
$SFI_n(t), \%$	40	70	100	130	175

Такий підхід дозволяє фіксувати не лише факт високої наповненості, але й ступінь перевищення нормативного рівня, що є особливо важливим для диспетчерських систем управління громадським транспортом та систем підтримки прийняття рішень. Бо в реальному місті:

- є аварії;
- є затримки;
- є масові скупчення;
- є пікові години.

Тому зупинка реально може бути більш перевантаженою, ніж у калібрувальній вибірці.

Запропонований підхід дозволяє забезпечити коректну інтерпретацію рівнів наповненості та можливість виявлення аномально перевантажених сцен без втрати інформативності показника.

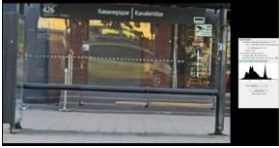
Таким чином, побудована математична модель на основі запропонованих інтегрального $SFI(t)$ та нормованого $SFI_n(t)$ індексів наповненості сцени забезпечує можливість проведення систематичного порівняльного аналізу окремих відеокадрів шляхом кількісного оцінювання рівня наповненості простору об'єктами.

2.3 Аналіз зображень з IP-камер на зупинках за побудованою математичною моделлю

Експериментальні дослідження проводилися на реальних відеоданих, отриманих з IP-камер інформаційно-вимірювальної мережі комп'ютерної системи «розумне місто». Для кожної сцени обчислювалися значення ентропії, контрасту, міжкадрової різниці та інтегрального індексу наповненості.

Експериментальні результати аналізу зображень з IP-камер «розумного міста» на зупинках МПТ за побудованою математичною моделлю (2.1)–(2.5) наведені в табл. 2.4. Було розглянуто сцени з рівнем наповненості «порожня», «мала наповненість», «середня наповненість», «висока наповненість»,

Таблиця 2.4 – Розрахунок $SFI(t)$ для сцен різного рівня наповненості

Сцена		Ентропія $H(t)$	Контраст $\sigma(t)$	Міжкадрова різниця $D_{diff}(t)$	Інтегральний індекс наповненості кадру $SFI(t)$
Фото	Рівень наповненості				
	Порожня	4,21	18,3	1,5	115
	Мала наповненість	5,02	24,1	2,4	290
	Середня наповненість	5,88	31,7	3,1	580
	Висока наповненість	6,43	39,5	4,0	1020

Отримані в табл. 2.4 результати демонструють монотонне зростання значення $SFI(t)$ зі збільшенням кількості пасажирів у зоні зупинки, що підтверджує наявність кореляції між введеним інтегральним індексом наповненості $SFI(t)$ та реальною наповненістю зони зупинки людьми.

Як було зазначено у п. 2.2.5, використання нормованого індексу $SFI_n(t)$ дозволяє вводити порогові значення для подальшої класифікації кадрів за категоріями наповненості, що сприяє стандартизації оцінок та підвищенню точності аналітичних процедур у рамках досліджень потоків пасажирів або інших подібних сценаріїв спостереження.

Вищенаведені теоретичні розробки були використані для вирішення прикладної задачі організації бізнес-процесу міських пасажирських перевезень на маршрутах № 16 та № 56 МПТ м. Миколаєва [15].

З IP-камер КС «розумне місто» було отримано одночасно колекцію кадрів з відповідно 33 зупинок (з маршруту № 16) та 28 зупинок (з маршруту № 56) станом на 17:30 (додатки В.1 та В.2). Зважаючи на те, що забезпечення обраних маршрутів здійснюється одним перевізником, була поставлена задача диспетчеру прийняти рішення, на який з маршрутів необхідно першочергово подати ТЗ. Для цього було виконано для кожної зупинки перетворення кадру з її фото (стовбець 2 табл. В.1–В.2), отримане з IP-камер IBM КС «розумне місто» (розташовані на кожній зупинці МПТ), на RGB-гістограми яскравості (стовбець 3 табл. В.1–В.2). Наступним кроком було виконання серії розрахунків за моделлю (2.1)–(2.7), в результаті яких визначено інтегральний та нормований індекс наповненості кожного кадру (відповідно стовбці 7 та 8 табл. В.1–В.2) станом на 17:30.

Результати розрахунків показали, що середній відсоток наповненості зупинок о 17:30:

- для маршруту № 16 $SFI_{n_{\text{сер}}}(17:30) = 51,38 \%$ (див. додаток В.1);
- для маршруту № 56 $SFI_{n_{\text{сер}}}(17:30) = 68,64 \%$ (див. додаток В.2).

За результатами аналізу наповненості зупинок пасажирами у реальному часі цілком виправданим було рішення диспетчера перевізника надати транспортний засіб на маршрут № 56.

Для перевірки ефективності прийнятого рішення о 18:00 також з IBM КС «розумне місто» було здійснено моніторинг у реальному часі зупинок

на маршруті № 56 (табл. В.3). Розрахований показник $SFI_{n_{\text{сер}}}(18:00) = 13,08\%$ засвідчив, що людина, яка прийняла відповідне рішення, ефективно використала надані їй математичні та програмні інструменти, завдяки чому зупинки пасажирського транспорту були розвантажені майже в 5 разів.

Таким чином, запропонована матмодель з результируючим розрахунком розрахунок середнього відсотку наповненості зупинок певного маршруту $SFI_{n_{\text{сер}}}(t)$ створює основу для автоматизованого моніторингу та прийняття рішень, оскільки інтегральна характеристика враховує сукупні параметри сцени, зменшуючи вплив випадкових коливань та шумів у візуальних даних.

Запропонована математична модель продемонструвала стабільність роботи в реальних умовах та може бути використана у системах «розумного міста» для підтримки управлінських рішень щодо своєчасної подачі ТЗ на маршрут з високим рівнем наповненості зупинок пасажирами.

Наступні задачі, вирішення яких потребує подальших досліджень:

- по-перше, побудування моделі енергоспоживання об'єктами IBM КС «розумне місто» на кожній зупинці МПТ та IoT-пристроями кінцевих користувачів (диспетчерів перевізників) для аналізу можливості та визначення часу енергонезалежності зазначеного обладнання ;
- по-друге, моделювання процесів прийняття рішень щодо розподілу та вибору моделей пасажирського транспорту (з різним рівнем комфортності, інклюзії та ін. критеріями) в умовах невизначеності та неповних даних із зупинок МПТ, спричинених різним рівнем освітленості за зміни погодних умов та часу доби, шумами на зображеннях, аваріями на лініях зв'язку та мережевих ресурсах тощо.

Зазначені питання будуть досліджені у наступних підрозділах та у розділі 3.

2.4 Розробка моделі енергоспоживання IoT-пристроїв як хостів IBM КС «розумне місто»

2.4.1 Математична модель енергоспоживання IoT-пристрою на основі багатоядерного процесора

У якості хостів IBM КС «розумне місто» використовуються різноманітні IoT-пристрої (мобільні телефони водіїв ТЗ, планшети диспетчерів перевізників, мікро- та мінікомп'ютери, підключені до IP-камер на зупинках ТЗ, тощо), які мають забезпечувати автономне функціонування підсистеми транспортних пасажироперевезень протягом деякого оптимального часу енергонезалежності, наприклад, протягом доби як одиниці чергування водія міського ТЗ та/або диспетчера перевізника. Для цього задачі моніторингу наповненості зупинок пасажирського транспорту та прийняття рішень щодо подачі ТЗ на певний маршрут необхідно як можна краще адаптувати до потреб динамічних обчислень і використання як можна менше енергії акумулятора використовуваного IoT-пристрою.

Тривалість автономної роботи акумулятора може бути збільшена шляхом ручного керування апаратними модулями пристрою, зокрема GPS, 3G, Wi-Fi та Bluetooth, із їх вимкненням у періоди простою. Водночас такий спосіб є малоефективним і нестійким, оскільки користувачеві складно безперервно контролювати стан і доцільність використання численних функціональних компонентів, зокрема:

- визначати, які з модулів мають залишатися активними у конкретний момент часу.
- забезпечувати керування функціональними компонентами з метою визначення та своєчасного відключення тих з них, використання яких не є критично необхідним у поточних умовах експлуатації, для запобігання надмірному споживанню обмежених обчислювальних, енергетичних і комунікаційних ресурсів IoT-пристрою.

Можливо піти іншим шляхом. Спільною характеристикою всіх зазначених IoT-пристроїв є використання багатоядерного центрального процесора (ЦП) для виконання обчислень, найчастіше 4- та 8-ядерних (наприклад, Intel Twin Lake Nx5x, AMD Ryzen 7, Exynos 9xxx, Snapdragon 6xx–8xx та ін.) [16].

Мінікомп’ютер CHUWI AuBox на базі 8-ядерного процесора AMD Ryzen 7 8745HS (рис. 2.2) може слугувати прикладом такого IoT-пристрою [17], який може бути розташованим на зупинці МПТ, оброблювати на місці кадри з IP-камер та відправляти в диспетчерську перевізника сигнал про рівень наповненості зупинки, за яким доцільно подати на маршрут ТЗ з певними характеристиками. Зазначений міні-ПК має малі габарити (154 мм × 152 мм × 45 мм), співставні з розмірами самої IP-камери, може обробляти до 150 кадрів на секунду, має на борту потужні мережеві модулі (Wi-Fi 6 | Bluetooth 5.1 | 2.5G), що дозволить йому приймати відеопотік від IP-камери за WiFi-інтерфейсом та відправляти дані в диспетчерську перевізника та/або КС «розумне місто» через Ethernet-підключення (зі швидкістю 2.5G) або навпаки.



Центральний процесор	Порти введення/виведення	Бездротове підключення	Адаптер живлення	Розмір, мм
AMD Ryzen™ 7 8745HS (8 Cores, 16 Threads, 4 nm Process, up to 4.9 GHz)	1× USB 4, 1× HDMI 2.1, 2× 2.5G LAN Jacks	Wi-Fi 6, Bluetooth 5.3	19V/6.32A, 120W	154 × 152 × 45

Рисунок 2.2 – Міні-ПК CHUWI AuBox на базі 8-ядерного процесора

Таким чином, доцільно розробити математичну модель, а на її основі створити програмне забезпечення (ПЗ) енергоспоживання IoT-пристрою на основі багатоядерного процесора.

Моделювання енергоспоживання є базовим технологічним підходом, який забезпечує аналіз витрат акумуляторного заряду центральним процесором та іншими електронними компонентами обчислювального пристрою та водночас

виступає важливим засобом керування системами живлення такого пристрою. Коректні і точні математичні моделі енергоспоживання процесора IoT-пристрою є вигідними як для користувачів, так і для розробників. Точні моделі електроживлення допомагають виявляти енерговитратні застосунки, і тому користувачі мають змогу контролювати роботу і збільшувати час автономного «життя» своїх IoT-пристроїв. Точні моделі енергоспоживання також допомагають розробникам профілювати і, отже, оптимізувати енергоспоживання своїх застосунків для таких пристроїв.

Ключовим обмеженням наявних підходів є те, що оцінювання споживання енергії в них здійснюється переважно з урахуванням тактової частоти та рівня завантаження ЦП, тоді як тривалість перебування у станах простою, що має істотний вплив на енергетичні витрати сучасних багатоядерних обчислювальних систем, не береться до уваги [18; 19].

Тобто, миттєву потужність споживання одного ядра P_{CPU_core} можна описати як лінійну залежність від частоти та завантаженості:

$$P_{CPU_core} = k_f \times f_{core} + k_u \times \sigma + b, \quad (2.8)$$

де f_{core} – поточна тактова частота;

σ – коефіцієнт завантаженості ядра (англ. utilization);

b – константа, що враховує базове енергоспоживання ЦП;

k_f, k_u – коефіцієнти регресії для частоти та завантаженості відповідно.

Формула (2.8) враховує базове енергоспоживання ЦП у стані простою (*Idle*).

Для всіх n ядер багатоядерного процесора

$$P_{CPU} = \sum_{i=1}^n k_f \times f_{core_i} + \gamma \times \Lambda + \varepsilon, \quad (2.9)$$

де Λ – показник стану простою чи системного очікування;

γ – коефіцієнт впливу режиму очікування на загальні енерговтрати;

ε – абсолютна статистична похибка або базовий рівень споживання.

Вираз (2.9) відображає особливість функціонування сучасних багатоядерних процесорів, відповідно до якої кожне обчислювальне ядро може

працювати на власній тактовій частоті, що адаптивно змінюється залежно від рівня навантаження: зростає за інтенсивного виконання задач і зменшується в умовах низької активності. За надмірних значень частоти f_{core_i} доцільним є перерозподіл або зняття частини обчислювальних завдань з метою підвищення загальної продуктивності та енергетичної ефективності системи. У випадках, коли в режимі простою (*Idle*) фіксується зростання частоти одного чи кількох ядер, це свідчить про виконання фонових системних процесів (наприклад, автоматичних оновлень), припинення яких може сприяти збільшенню енергонезалежності, тобто, тривалості автономної роботи IoT-пристрою.

У зв'язку з цим при створенні ПЗ моніторингу завантаженості ЦП у реальному часі та його енергоспоживання доцільно застосовувати удосконалений підхід до моделювання процесів живлення, що враховує параметри роботи ЦП у станах очікування. Такий підхід дозволяє істотно підвищити точність і стабільність оцінювання енерговитрат багатоядерних IoT-платформ. У межах запропонованої моделі використовується регресійний метод, який інтегрує коефіцієнти, що описують не лише тактову частоту та рівень завантаження процесора, але й показники його простою.

Перевірка адекватності запропонованої моделі здійснюється на основі співвідношень (2.8)–(2.9). Результати експериментальних досліджень навантаження 8-ядерного процесора подано в табл. 2.5. Значення в таблиці попередньо нормалізовано та подано у відсотковому вигляді (без позначення %), причому сума показників у межах кожного рядка наближається до 100 %.

Стовпчики табл. 2.5 представляють метрики ЦП (CPU).

Наведені в табл. 2.5 дані можуть бути корисними для аналізу навантаження на систему, виявлення «вузьких місць» (англ. *bottleneck*) та оптимізації продуктивності, наприклад:

- якщо $User + System < 70\text{--}80\%$, це вважається нормальним більшість завдань;
- якщо $Idle \approx 0\%$, процесор повністю зайнятий і система може бути перенавантажена;

– якщо значення *I/OWait* високе при низькому значенні *User*, це вказує на проблеми з дисковою підсистемою, а не з ЦП.

Таблиця 2.5 – Показники навантаженості 8-ядерного процесора IoT-пристрою

№ з/п	Процесор / Номер ядра	<i>User</i>	<i>Nice</i>	<i>System</i>	<i>I/OWait</i>	<i>Steal</i>	<i>Idle</i>
1	cpu (Average Value)	12,2	1,1	4,0	0,3	0	82,3
2	cpu0	65,0	5,0	10,0	2,0	0	18,0
3	cpu1	8,1	0,9	6,7	0,0	0	84,0
4	cpu2	8,9	1,0	6,0	0,0	0	83,9
5	cpu3	8,2	0,9	5,6	0,0	0	85,2
6	cpu4	2,0	0,4	1,1	0,0	0	96,5
7	cpu5	1,8	0,3	0,9	0,0	0	97,0
8	cpu6	2,1	0,3	0,9	0,0	0	96,7
9	cpu7	1,7	0,3	0,8	0,0	0	97,2

Стосовно конкретного протестованого режиму роботи, параметри якого наведені в табл. 2.5, можна зауважити, що:

- ядро *cpu0* характеризується найвищим рівнем завантаженості (*User* = 65,0; *Idle* = 18,0), що може свідчити про виконання на ньому ресурсоємної задачі (наприклад, обробки кадра з IP-камери);
- ядро *cpu1* є найменш навантаженим (*User* = 1,7; *Idle* = 97,2), що свідчить про нерівномірний розподіл навантаження між ядрами.
- середні значення по всіх ядрах – *cpu (Average Value)* – показує завантаження ЦП на рівні 12,2, що не відображає реальної картини нерівномірного розподілу навантаження.

Вищенаведене доводить важливість аналізу даних щодо окремих ядер ЦП для виявлення проблем з розподілом навантаження та оптимізації роботи IoT-пристрою на основі багатоядерного процесора.

Проаналізуємо метрики ядра *cpu0* з рядка 3 табл. 2.5:

- 1) *Processor/Core No.*: ідентифікатор процесора або ядра;
- 2) *User* = 65,0.

- Опис: Основне навантаження на процесор припадає на виконання процесів користувача (вебсервери, бази даних, скрипти тощо);

- Аналіз: Це нормальне значення для робочої системи, де активно використовуються програми або служби;

3) *Nice* = 5,0.

- Опис: Час, витрачений на виконання процесів зі зниженим пріоритетом (*nice*). відсоток часу, витраченого виконання процесів зі зниженим пріоритетом. Зазвичай використовується для фонових завдань (завдання резервного копіювання або збирання статистики);

- Аналіз: Невелике значення (5 %) вказує на наявність фонових завдань зі зниженим пріоритетом, але вони не мають істотного впливу на загальну продуктивність системи;

4) *System* = 10,0.

- Опис: Процесор витрачає 10 % часу на виконання системних завдань (наприклад, управління пам'яттю, мережеві операції, драйвери пристроїв, запис логів й т. Ін.);

- Аналіз: Значення 10 % перебуває у межах норми. Високі значення (> 20 %) могли б свідчити про проблеми з ядром чи драйверами;

5) *I/OWait* = 2,0.

- Опис: Процесор простоє 2 % часу, очікуючи завершення операцій введення-виведення (ЦП чекає на дані від диска, мережі або іншого пристрою);

- Аналіз: Отримане низьке значення (<5 %) свідчить про ефективне виконання операцій введення-виведення системою без істотних часових затримок. Якщо *I/OWait* > 10–20 %, ЦП перенавантажений, необхідно задіяти для даних інші диски та/або збільшити оперативну пам'ять;

6) *Steal* = 0.

- Опис: відображає частку процесорного часу, яка фактично вилучається гіпервізором у віртуальної машини (ВМ) в процесі розподілу

обчислювальних ресурсів, що є особливо актуальним для середовищ віртуалізації (зазвичай дорівнює «0»);

- Аналіз: Значення дорівнює 0 %, що означає, що система не обмежена ресурсами з боку гіпервізора. Це типово для фізичних машин або ВМ, які одержують достатню кількість обчислювальних ресурсів;

7) *Idle* = 18,0.

- Опис: Процесор простоє 18 % часу. чим більше, тим краще, якщо немає потреби в інтенсивному завантаженні ЦП.;

- Аналіз: Це значення досить велике (>10 %), що вказує на наявність запасу продуктивності для обробки пікових навантажень. Система не перевантажена.

На підставі отриманих даних щодо навантаження процесора можливо вдосконалити математичну модель енергоспоживання процесора з обрахуванням часу енергонезалежності IoT-пристрою *WorkTime* за формулами (2.10)–(2.12):

$$\begin{aligned} WorkTime = User + Nice + System + I/OWait + Steal + IRQ + SoftIRQ + \\ + GuestTime + GuestNiceTime, \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$TotalTime = WorkTime + Idle, \quad (2.11)$$

$$Usage = WorkTime / TotalTime. \quad (2.12)$$

В математичній моделі (2.10)–(2.12) використовуються уточнені значення вищенаведених параметрів [20]:

- *User*: частка процесорного часу, витрачена на виконання користувацьких процесів без зміненого пріоритету (*un-niced*). Значення, що не перевищують 50–70 %, зазвичай вважаються допустимими для більшості сценаріїв роботи, хоча конкретна межа визначається умовами експлуатації. Перевищення цього діапазону може свідчити про наявність некерованих або надмірно ресурсоємних процесів;

- *Nice*: частка процесорного часу, що використовується користувацькими процесами зі зниженим пріоритетом (*niced*). Аналогічно до показника *User*, цей параметр характеризує виконання завдань поза ядром операційної системи.

Процеси з рівнем *nice* у діапазоні від 1 до 20 мають нижчий пріоритет і зазвичай не спричиняють деградації продуктивності, оскільки високопріоритетні задачі обслуговуються першочергово. Водночас надмірне споживання процесорного часу такими процесами може негативно впливати на стабільність функціонування системи. Якщо *Nice* > 20 %, це означає, що запущено багато фонових завдань із низьким пріоритетом, що може вплинути на інші процеси. Чим менший цей параметр, тим більший час енергонезалежності пристрою;

- *System*: частка процесорного часу, що використовується на виконання системних операцій. Більшість прикладних програм включають як користувацькі, так і компоненти ядра, тому під час обробки системних викликів, перевірки прав доступу або взаємодії з апаратними пристроями від імені застосунків відповідне навантаження фіксується у цьому показнику. У разі виконання коду поза межами ядра обчислювальний час відображається в метриках *User* або *Nice*, залежно від встановленого пріоритету процесу.

- *I/O Wait*: інтервал часу, протягом якого центральний процесор перебуває в очікуванні завершення операцій введення-виведення. Цей параметр характеризує ситуації, коли ЦП ініціював операцію читання або запису та призупинив активне виконання до отримання результату. Подібно до стану *Idle*, короткочасні коливання значень є типовими, однак часті або тривалі періоди очікування можуть свідчити про затримки або блокування виконання окремих завдань («зависання»). Якщо *I/OWait* > 10–20 %, ЦП перенавантажений, необхідно задіяти для даних інші диски та/або збільшити оперативну пам'ять;

- *Steal*: частка процесорного часу, використана гіпервізором. Даний показник відображає період, протягом якого віртуальний процесор перебуває в очікуванні доступу до фізичного ядра, оскільки обчислювальні ресурси в цей момент задіяні гіпервізором або іншими ВМ. У випадку перенавантаження хост-системи виникає дефіцит доступних процесорних ресурсів, унаслідок чого ВМ не отримує необхідний обсяг обчислювального часу ЦП, що негативно позначається на її продуктивності та часових характеристиках виконання завдань. Як правило, цей показник в ОС дорівнює «0»;

- *IRQ*: час обслуговування апаратних переривань, ініційованих фізичними пристроями;
- *SoftIRQ*: час, витрачений на виконання програмних переривань, які генеруються процесами, а не апаратними компонентами. На відміну від апаратних переривань, що обробляються безпосередньо на рівні ЦП, програмні переривання реалізуються виключно в межах ядра ОС;
- *GuestTime* – час, протягом якого виконується код гостьової ОС (віртуальної машини) у звичайному режимі пріоритетів.
- *GuestNiceTime* – частка процесорного часу, використана на виконання гостьової ОС із зниженим пріоритетом (*nice*-рівнем);
- *Idle*: інтервал часу, витрачений на обробку стану простою ядра. Цей показник характеризує відсоток часу, протягом якого ЦП не виконував активних обчислень, був доступний та/або простоював. Якщо *Idle* < 5 %, це свідчить про те, що ЦП працює на межі можливостей, треба зменшити фонове навантаження. Орієнтир: *Idle* > 10 %. З точки зору енергоспоживання, чим більший цей параметр, тим більший час енергонезалежності пристрою. Вважається, що система розумно використовує ЦП, коли сума показників *User*, *Nice* та *Idle* наближається до 100 %.

Варто зауважити, в побудованій моделі передбачають їх визначення для кожного ядра окремо. Сума окремих метрик може мати значення понад 100 %, якщо задача (наприклад, гостьова ОС ВМ) одночасно виконується на кількох ядрах (наприклад, 400 % для 4 ядер).

Сучасні дослідження доводять, що застосунки для моніторингу та керування енергоспоживанням КС не завжди повністю використовують багатоядерні можливості [21–23]. Запропонована модель енергоспоживання, оптимізована під сучасні багатоядерні процесори, може бути використана для розроблення програми-планувальника для більш тонкого контролю робочих навантажень багатоядерного ЦП – задач, які переносяться між ядрами, їх рівномірного розподілу і резервування окремих ядер під ресурсоємні завдання [24; 25]. Оскільки такий планувальник має виконувати безпосередню міграцію задач між ядрами,

накладні витрати ядра можуть бути знижені, і тим самим підвищено енергоефективність і час енергонезалежності IoT-пристрою.

Таким чином, розроблена математична модель є функціонально повною та придатною для створення програмного застосунку-планувальника, який зможе відстежувати навантаження на процесор (по кожному окремому ядру процесора та загальне) в режимі реального часу. За таким підходом можливо суттєво зменшити споживання обмежених енергоресурсів IoT-пристроєм та збільшити час його енергонезалежності.

2.4.2 Розробка математичних моделей об'єктів IBM

Для оцінювання часу енергонезалежності сегменту IBM на зупинці пасажирського транспорту доцільно розроблення та використання спрощених одновимірних математичних моделей зменшеного порядку для об'єктів IBM «розумного міста» (рис. 2.3).

Модель сонячної електростанції

Потужність сонячної панелі P , Вт:

$$P = \eta \times G \times A, \quad (2.13)$$

де η – коефіцієнт корисної дії (ККД);

G – сонячна радіація, Вт/м². Представляє собою потужність сонячної енергії, що падає на одиницю площі панелі за одиницю часу;

A – площа панелі, м².

З урахуванням таблиці сонячної інсоляції по містах України (табл. 2.6), математична модель (2.13) дає можливість дійти висновку, що протягом року сезонні коливання потужності P в Миколаївській області становлять двократний діапазон. Очевидно й інше: при однакових значеннях параметра A та при інших рівних умовах, встановлення ІР-камер з незалежним енергоживленням від сонячних панелей в Миколаївській області буде більш ефективним ніж у Львівській або Тернопільській областях.

Зважаючи на те, що сучасні сонячні панелі мають потужність від 250 Вт до 400 Вт з відповідною площею 1,65–1,98 м², а споживана потужність ІР-камери не перевищує 25 Вт, встановлення однієї панелі є достатньою для електроживлення ІР-камери із створенням запасу енергії протягом світлої частини доби для автономного електроживлення від акумуляторної батареї (див. рис. 2.2) в темний час доби.

Наведена математична модель дозволяє розрахувати необхідну площу панелі в залежності від інсоляції регіону України.

Таблиця 2.6 – Сонячна інсоляції по містах України [26]

кВт·год /м²/ день

Міста/Місяці	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень	Сер.
Вінниця	1.07	1.89	2.94	3.92	5.19	5.30	5.16	4.68	3.21	1.97	1.10	0.90	3.11
Дніпропетровськ	1.21	1.99	2.98	4.05	5.55	5.57	5.70	5.08	3.66	2.27	1.20	0.96	3.36
Донецьк	1.21	1.99	2.94	4.04	5.48	5.55	5.66	5.09	3.67	2.24	1.23	0.96	3.34
Житомир	1.01	1.82	2.87	3.88	5.16	5.19	5.04	4.66	3.06	1.87	1.04	0.83	3.04
Запоріжжя	1.21	2.00	2.91	4.20	5.62	5.72	5.88	5.18	3.87	2.44	1.25	0.95	3.44
Івано-Франківськ	1.19	1.93	2.84	3.68	4.54	4.75	4.76	4.40	3.06	2.00	1.20	0.94	2.94
Київ	1.07	1.87	2.95	3.96	5.25	5.22	5.25	4.67	3.12	1.94	1.02	0.86	3.10
Кропивницький	1.20	1.95	2.96	4.07	5.47	5.49	5.57	4.92	3.57	2.24	1.14	0.96	3.30
Луцьк	1.02	1.77	2.83	3.91	5.05	5.08	4.94	4.55	3.01	1.83	1.05	0.79	2.99
Луганськ	1.23	2.06	3.05	4.05	5.46	5.57	5.65	4.99	3.62	2.23	1.26	0.93	3.34
Львів	1.08	1.83	2.82	3.78	4.67	4.83	4.83	4.45	3.00	1.85	1.06	0.83	2.92
Миколаїв	1.25	2.10	3.07	4.38	5.65	5.85	6.03	5.34	3.93	2.52	1.36	1.04	3.55
Одеса	1.25	2.11	3.08	4.38	5.65	5.85	6.04	5.33	3.93	2.52	1.36	1.04	3.55
Полтава	1.18	1.96	3.05	4.00	5.40	5.44	5.51	4.87	3.42	2.11	1.15	0.91	3.25
Рівне	1.01	1.81	2.83	3.87	5.08	5.17	4.98	4.58	3.02	1.87	1.04	0.81	3.01
Суми	1.13	1.93	3.05	3.98	5.27	5.32	5.38	4.67	3.19	1.98	1.10	0.86	3.16
Сімферополь	1.27	2.06	3.05	4.30	5.44	5.84	6.20	5.34	4.07	2.67	1.55	1.07	3.58
Тернопіль	1.09	1.86	2.85	3.85	4.84	5.00	4.93	4.51	3.08	1.91	1.09	0.85	2.99
Ужгород	1.13	1.91	3.01	4.03	5.01	5.31	5.25	4.82	3.33	2.02	1.19	0.88	3.16
Харків	1.19	2.02	3.05	3.92	5.38	5.46	5.56	4.88	3.49	2.10	1.19	0.90	3.26
Херсон	1.30	2.13	3.08	4.36	5.68	5.76	6.00	5.29	4.00	2.57	1.36	1.04	3.55
Хмельницький	1.09	1.86	2.87	3.85	5.08	5.21	5.04	4.58	3.14	1.98	1.10	0.87	3.06
Черкаси	1.15	1.91	2.94	3.99	5.44	5.46	5.54	4.87	3.40	2.13	1.09	0.91	3.24
Чернігів	0.99	1.80	2.92	3.96	5.17	5.19	5.12	4.54	3.00	1.86	0.98	0.75	3.03
Чернівці	1.19	1.93	2.84	3.96	4.54	4.75	4.76	4.40	3.06	2.00	1.20	0.94	2.94

Залежність коефіцієнта корисної дії від температури:

$$\eta = \eta_0 \times (1 - \beta \times (T - T_0)),$$

де η_0 – номінальний ККД;

β – температурний коефіцієнт;

T – температура панелі;

T_0 – стандартна температура.

Модель вітрової електростанції:

Потужність вітрової турбіни:

$$P = 0,5 \times \rho \times A \times v^3 \times C_p, \quad (2.14)$$

де ρ – густина повітря;

A – площа, ометена лопатями;

v – швидкість вітру;

C_p – коефіцієнт потужності (залежить від конструкції турбіни).

Модель системи накопичення енергії:

Напруга на батареї:

$$U = E - I \times R, \quad (2.15)$$

де E – електрорушійна сила, В;

I – струм, А;

R – внутрішній опір, Ом.

Заряд батареї:

$$Q = \int I(t) \times dt, \quad (2.16)$$

де $I(t)$ – залежність струму I , А, від часу t , с.

Важливо зазначити, що математичні моделі (2.13)–(2.16) є спрощенням реальних систем, і їх точність залежить від якості вихідних даних та складності моделі [27]. Вибір конкретної математичної моделі визначається цілями моделювання та специфікою досліджуваної системи. Для складних систем альтернативного живлення часто використовують комплексні моделі, що поєднують декілька підмоделей.

2.5 Побудова енергонезалежних IBM з організацією живлення IP-камер на зупинках від альтернативних джерел живлення

Одним із основних інноваційних трендів розвитку IBM Smart City є забезпечення енергонезалежного обладнання для відеоспостереження (IP-камери,

телекомунікаційного обладнання тощо), встановленого на зупинках пасажирського міського транспорту [28]. У такому разі доцільно використовувати, наприклад, вуличну Wi-Fi камеру відеоспостереження Solar ABQ-Q1 Full HD [29] або iCAM-Solar365 [30] або іншу аналогічну. Спільні вимоги до таких IP-камер – наявність, окрім підключення до міської мережі електроживлення, можливість живлення від сонячної панелі, вітрогенератора або іншого альтернативного джерела електроживлення (рис. 2.3) та накопичення енергії у зовнішніх акумуляторах (рис. 2.4).



Рисунок 2.3 – Система електроживлення від альтернативних джерел для камер відеоспостереження [30]

Основні моделі IP-камер мають режим нічного бачення та інфрачервоне освітлення в межах від 30 м до 150 м (в залежності від моделі), що відповідає розмірам зупинок міського пасажирського транспорту. Енергія від сонячної панелі може накопичуватись, наприклад, в двох акумуляторах ємністю від 3000 mAh у форм-факторі 18650 [31] до 64 Ah [32], від яких працює IP-камера. Цілорічне живлення для камер відеоспостереження та бездротових пристроїв забезпечує енергією навантаження до 50 Вт протягом року та 120 Вт протягом літа з березня по вересень. Час автономної роботи цих IP-камер становить 10 днів (запас енергії на період без зарядки).



Рисунок 2.4 – Функціональна схема гібридного живлення ІР-камери

Для забезпечення визначеного часу енергонезалежності та ефективного функціонування IBM KC Smart City доцільно організовувати як CCTV (Closed Circuit Television), тобто, як систему відеоспостереження, в якій відеосигнали передаються на обмежену кількість моніторів або пристроїв запису міського диспетчерського пункту. Головною характеристикою систем відеоспостереження є те, що відеосигнали передаються тільки всередині замкнутої системи (в даному випадку – системи Smart City) і не транслюються в загальнодоступні мережі (рис. 2.5), хоча і мають можливість отримувати з них необхідні дані (погодні умови, обіг коштів за перевезення тощо) [33; 34].

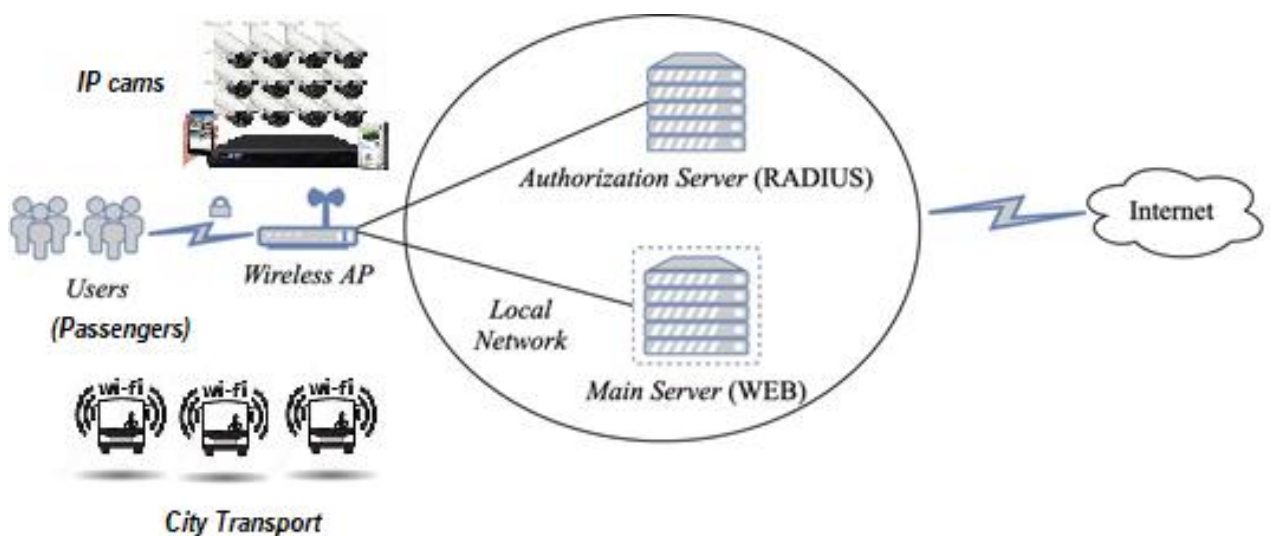


Рисунок 2.5 – Схема організації замкнутої системи IBM в Smart City

В такому разі підключення користувачів (Passengers) до IBM, наприклад, для отримання інформації щодо часу подачі міського автотранспорту на зупинку, доцільно здійснювати через протокол RADIUS, який є найпоширенішим протоколом AAA (Authentication, Authorization, and Accounting) для захисту від несанкціонованого доступу. Таким чином, реалізується підвищення рівня безпеки й захисту даних, що циркулюють в IBM KC Smart City [35; 36].

Розроблений сервіс оперативного забезпечення подачі МПТ до зупинок виконує функції безперервного збору інформації про рівень наповненості зупинок пасажирями у режимі реального часу та передавання узагальнених результатів моніторингу диспетчерським службам перевізників. До того ж, активізацію пристроїв у режим енергоспоживання з виконанням основної функцію (відеозйомки, передачі мережевого трафіку й т. і.) доцільно організовувати тільки під час наявності певних подій на об'єкті спостереження (наприклад, руху та/або зміни наповненості зупинки міського транспорту). Спосіб такої індивідуальної активізації різноманітного обладнання у складі IBM та його підключення до електроживлення запропоновано в [37].

Доцільність використання наведених вище результатів досліджень було доведено в НДР № держ. реєстр. 0118U000193, в якій вони були використані для реалізації систем реального часу, в яких передбачено збір, аналіз та передача даних в межах уособлених аналітичних комплексів (додаток А.1).

Висновки до розділу 2

У розділі здійснено дослідження основних компонентів IBM KC «розумне місто» для розроблення системи визначення рівня наповненості пасажирями зупинок міського автотранспорту. Було розроблено нижчезазначені математичні моделі та перевірено їх функціональну працездатність:

- 1) математична модель аналізу RGB-зображень з IP-камер IBM KC «розумне місто» з введенням інтегрального та нормованого індексів наповненості кадру. Порівняння із нейромережевими методами показало, що запропонована модель має значно меншу обчислювальну складність та не потребує апаратного

прискорення. На відміну від YOLO, метод не здійснює детекцію окремих осіб, що підвищує рівень конфіденційності. Разом з тим, YOLO забезпечує точний підрахунок об'єктів, тоді як запропонований індекс призначений для оцінювання загального рівня наповненості;

2) математична модель оптимізованого енергоспоживання у локальних пунктах оброблення зображень експертами перевізників засобами IoT-пристроїв шляхом розподілу обчислень у режимі реального часу між ядрами центрального процесора IoT-пристрою, що дозволяє зменшити коефіцієнт завантаженості процесора та збільшити час енергонезалежності хостів IBM;

3) спрощені одновимірні математичні моделі зменшеного порядку для об'єктів IBM «розумного міста», що дозволяє здійснювати оцінювання часу енергонезалежності сегменту IBM на зупинці пасажирського транспорту при використанні задіяного джерела живлення та планувати своєчасне та автоматизоване переключення хоста IBM на інше джерело живлення.

Отримані результати підтверджують доцільність використання інтегрального та нормованого індексів наповненості як альтернативи складним нейромережевим підходам у задачах моніторингу міської інфраструктури.

На основі запропонованої моделі енергоспоживання IoT-пристроями на базі багатоядерних ЦП забезпечується можливість здійснення моніторингу рівня завантаження ЦП з подальшим поданням зібраних показників у графічному вигляді, зокрема у формі діаграм. Такий підхід надає користувачеві інструменти для аналізу динаміки частотних характеристик у заданому часовому інтервалі та ідентифікації програмних компонентів, які формують найбільше навантаження на обчислювальний пристрій. Окрім цього, функціональні можливості ПЗ на основі зазначеної моделі можуть передбачати контроль температурного режиму апаратної платформи та оцінювання поточного стану акумуляторної батареї, що сприятиме підвищенню ефективності управління ресурсами системи.

Ідея побудови енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж з організацією живлення IP-камер на зупинках від сонячних панелей, компактних вітрогенераторів або міської електромережі міста» створює унікальну можливість

для покращення планування доставки міського транспорту та зменшення споживання енергії у КС «розумне місто».

Результати досліджень другого розділу опубліковані в роботах [9; 10; 20; 25; 27; 28; 34; 35; 37].

Список використаних джерел до розділу 2

1. Eyupoglu C. Implementation of Bernsen's locally adaptive binarization method for gray scale images. *The Online Journal of Science and Technology*. April 2017. Vol. 7, Is. 2. P. 68–72.
2. Patent № US8,351,699 B2 USA. Int. CI (2006.01) G06K 9/00. Methods and apparatus for adaptive auto image binarization / D. Li, J. Elton, S. Steger; Assignee: Accusoft Co., Tampa, FL (US). Appl. No. 12/642,643; Filed: Dec. 18, 2009; Date of Pat.: Jan. 8, 2013. 17 p.
3. Shaikh A., Botcha S., Krishna M., Kumar S. Otsu based differential evolution method for image segmentation : preprint, 19 pages, October 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/364422460_Otsu_based_Differential_Evolution_Method_for_Image_Segmentation (Last accessed: 12.10.2025).
4. Patent № US9,025,897 B1 USA. Int. CI (2006.01) G06K 9/00. Methods and apparatus for adaptive auto image binarization / J. H. Elton, S. A. Martucci; Assignee: Accusoft Co., Tampa, FL (US). Appl. No. 13/867,605; Filed: Apr. 5, 2013; Date of Pat.: May. 5, 2015. 16 p.
5. Adobe Inc.. Viewing Histograms and Pixel Values in Photoshop. Офіційний посібник користувача Adobe Photoshop. Опубл. 25 травня 2023 р. URL: helpx.adobe.com/ua/photoshop/using/viewing-histograms-pixel-values.html (дата звернення: 12.11.2025).
6. The GIMP Development Team. Section 2.5. Histogram Dialog. URL: docs.gimp.org/2.10/en/gimp-histogram-dialog.html (Last accessed: 12.11.2025).
7. Darktable Authors. Histogram Module. Документація користувача darktable про гістограму як графічне представлення рівнів освітленості

зображення. URL: docs.darktable.org/usermanual/3.6/uk/module-reference/utility-modules/shared/histogram/ (дата звернення: 12.11.2025).

8. Pradeep, Namratha M., Manu G. V. Global and localized histogram equalization of an image. *International Journal of Computational Engineering Research*. Oct. 2012. Vol. 2, Is. 6. P. 238–252. URL: https://www.researchgate.net/publication/317784374_Global_and_localized_histogram_equalization_of_an_image#fullTextFileContent (Last accessed: 12.10.2025).

9. Свідцтво про реєстрацію авторського права на твір 139134. Комп'ютерна програма «BRIGHTNESS_HISTOGRAM» : комп'ютерна програма / В. О. Буренко, В. А. Гусєва-Божаткіна ; дата реєстр. 28.08.2025, Бюл. № 93. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1878768/>, <https://iprop-ua.com/?qc=139134> (дата звернення: 21.10.2025).

10. Буренко В. О. Аналіз наповненості зупинок пасажирського транспорту за допомогою алгоритмів обробки зображень з IP-камер «розумного міста». *Вісник Хмельн. нац. ун-ту. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 1, № 5. С. 47–52. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-325-5.

11. Введення в Java FX. Опубл. 04 серпня 2023 р. URL: <https://javarush.com/ua/groups/posts/uk.2560.vvedennja-v-java-fx> (дата звернення: 07.08.2025).

12. Steyer R. JavaScript und der JavaFX scene builder. *In book: Einführung in JavaFX*. Springer, 2014. P. 143–164. DOI: 10.1007/978-3-658-02836-7_6.

13. Dovramadjiev T. 2D image to 3D scene Blender + Gimp Tutorial : presentation. Publ. March 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.17597.56808/1.

14. Srinivasan P. An alternate formulation for computing/validating the Shannon entropy of probability distributions. *American Journal of Mathematical and Computer Modelling*. 2025. Vol. 10, No. 4. P. 145–150. DOI: 10.11648/j.ajmcm.20251004.13.

15. EasyWay. Миколаїв : онлайн-сервіс та мобільний застосунок для моніторингу та навігації громадським транспортом. URL: <https://www.eway.in.ua/ua/cities/mykolaiv/routes> (дата звернення: 12.12.2025).

16. CPU Specs Database. URL: https://www.techpowerup.com/cpu-specs/?f=codename_=Twin%20Lake (Last accessed: 12.10.2025).

17. CHUWI AuBox 8745. Overview. Specifications. RL: <https://www.chuwi.com/product/items/chuwi-aubox-8745.html> (Last accessed: 12.10.2025).

18. Zhuravska I. M., Koretska O. O., Musiyenko M. P., Surtel W., et al. Self-powered information measuring wireless networks using the distribution of tasks within multicore processors. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments : Proceedings of SPIE*, Wilga, Poland, 28 May – 06 June 2017. Vol. 10445, UNSP 1044527. P. 1–13. DOI: 10.1117/12.2280965. ISSN 0277-786X.

19. Журавська І. М., Обухова К. О., Савінов В. Ю. Моделювання енергоспоживання багатоядерного процесора клієнтського пристрою під час онлайн-з'єднання. Електротехнічні та комп'ютерні системи / Державний університет «Одеська політехніка». 2021. № 35 (111). С. 73–82. DOI: 10.15276/eltecs.35.111.2021.6.

20. Obukhova K., Zhuravska I., Burenko V. Diagnostics of power consumption of a mobile device multi-core processor with detail of each core utilization. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) : Proc. of the 2020 IEEE 15th Int. Conf.*, Lviv, Ukraine, Feb. 25–29, 2020 / Lviv Polytechnic National University. P. 368–372. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235456.

21. Li X., Chen G., Wen W. Energy-efficient execution for repetitive app usages on big.LITTLE architectures. *2017 IEEE 54th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC)*, Austin, TX, USA, 18–22 June 2017. DOI: 10.1145/3061639.3062239.

22. Nam Ye., Park M. Energy-aware core switching for big.LITTLE multicore mobile platform. *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Las Vegas, NV, USA, 12–14 Jan. 2018, DOI: 10.1109/ICCE.2018.8326264.

23. Kim M., Kim K., Geraci J. R., Hong S. Utilization-aware load balancing for the energy efficient operation of the big.LITTLE processor. *2014 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, Dresden, Germany, 24–28 March 2014. DOI: 10.7873/DATE.2014.236.

24. Vajda A. Programming many-core chips. Springer Science & Business Media, 2011. 228 p.

25. Журавська І. М., Савінов В. Ю., Корецька О. О., Буренко В. О. Розподілення навантаження між багатоядерними обчислювачами для задач енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж. *Наукові праці / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили.: наук. журн. Миколаїв*, 2017. Т. 307, Вип. 295. С. 42–46 (Серія : Комп'ютерні технології). URL: <https://journals.indexcopernicus.com/search/article?articleId=1814745> (дата звернення: 14.12.2025).

26. Інсоляція: вплив на виробництво електроенергії сонячними панелями. Опубл. 20.10.2024. URL: <https://www.solargarden.com.ua/insolyatsiya-vplyv-na-vyrobnytstvo-elektroenergiyi-sonyachnymy-panyamy/> (дата звернення: 07.08.2025).

27. Burenko V. O. Planning of urban transport delivery according to data from the non-volatile information-measurement network of the Smart City. *Modern engineering and innovative technologies*. 2025. Is. 40. P. 106–120. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2025-40-01-026>.

28. Burenko V. O., Guseva-Bozhatkina V. A. Development of models for the decision-making process regarding the choice of urban passenger vehicles. *SWorld-Ger Conference on Future in the results of modern scientific research*, Germany, Karlsruhe, 20 Aug. 2025. P. 31–37. DOI: 10.30890/2709-1783.2025-40-00-003.

29. Вулична WIFI-камера відеоспостереження Solar ABQ-Q1 Full HD. URL: <https://realshop.com.ua/ua/p1550284023-ulichnaya-wifi-kamera.html> (Last accessed: 07.08.2025).

30. Solar and battery power for CCTV cameras. URL: <https://camsat-cctv.com/category/solar-and-battery-power-for-cctv-cameras/> (Last accessed: 07.08.2025).

31. Li-Ion акумулятор формату 18650. URL: https://bestbattery.com.ua/ua/li_ion_1850_ua/li_ion_18650_ua/ (Last accessed: 07.08.2025).

32. iCAM-Battery. External battery supply system for CCTV cameras with PoE+. URL: <https://camsat-cctv.com/icam-battery/> (Last accessed: 07.08.2025).

33. Kurniawan F. Urban distribution CCTV for Smart City using decision tree methods. In: *International Seminar on Intelligent Technology and Its Application*. 2017. P. 21–24. URL: <https://www.researchgate.net/publication/320148770> (Last accessed: 07.08.2025).

34. Божаткін С. М., Буренко В. О. Достовірність передачі даних в інформаційних системах управління живленням за допомогою Wi-Fi. *Сучасні проблеми інформаційної безпеки на транспорті* : зб. тез V Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю, Миколаїв, 26–28 листопада 2015 р. С. 100–101.

35. Bozhatkin S., Guseva-Bozhatkina V., Farionova T., Pasiuk B., Burenko V. Emergency notification computer system via telecommunication equipment of the organization's local network. *Computer systems and information technologies*. 2023. Vol. 1, no. 10. P. 21–28. DOI: 10.31891/csit-2023-1-3

36. Murad F. A., Agustin M., Hermawan I., Puspita R., et al. Enhancing community security through smart Closed-Circuit Television Technology. *Bubungan Tinggi Jurnal Pengabdian Masyarakat*. 2025. Is. 7(2):453. P. 453–465. DOI: 10.20527/btjpm.v7i2.13308.

37. Гусєва-Божаткіна В. А., Фаріонова Т. А., Божаткін С. М., Буренко В. О. Спосіб індивідуальної активізації освітлювальних ламп, підключених до освітлювальної системи з мікропроцесорним управлінням з живленням від однофазної мережі. Пат. на корисну модель 133447 Україна, МПК H05B 39/04 (2006.01). № u201810299 ; заявл. 17.10.2018 ; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 7. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1344750/> (дата звернення: 21.10.2025).

РОЗДІЛ 3

ПОБУДОВА МОДЕЛІ ГРУПОВИХ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПОДАЧІ МІСЬКОГО ТРАНСПОРТУ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ БАГАТОВИМІРНИХ ДАНИХ З ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖ «РОЗУМНОГО МІСТА»

3.1 Моделювання процесів прийняття рішень щодо розподілу та вибору пасажирського транспорту

3.1.1 Концептуальні ієрархічні моделі

Для якісного розуміння процесу вибору транспортних засобів (ТЗ) для подання на заповнені зупинки пасажирського транспорту доцільно побудувати концептуальну ієрархічну модель ухвалення рішення про вибір транспортного засобу (ТЗ) для забезпечення розвантаження зупинок пасажирського транспорту від пасажирів, що очікують ТЗ. Йдеться про співвідношення пріоритетів критеріїв «Вигоди» та «Витрати», тобто пріоритетів альтернативних моделей пасажирського транспорту, оцінка яких виконана експертами з ієрархічної моделі для критеріїв «Вигоди» та «Витрати».

Концептуальна ієрархічна модель даних є структурою, в якій інформація організована у вигляді дерева, де кожен вузол (елемент даних) може мати тільки одного з батьків (за винятком кореневого вузла) і кілька нащадків. Ця модель добре підходить для подання відносин «один-до-багатьох», коли один батьківський елемент пов'язаний із кількома дочірніми.

Основні характеристики концептуальної ієрархічної моделі:

- **деревоподібна структура.** Дані організовані у вигляді дерева, де кожен вузол є елементом даних, а зв'язки між вузлами визначають відносини «предок-нащадок»;
- **відносини «один-до-багатьох».** Кожен вузол, крім кореневого, має лише одного з батьків, але може мати кілька дочірніх елементів;

– **простота та наочність.** Ієрархічна модель проста для розуміння та реалізації, особливо у випадках, коли дані мають чітку ієрархічну структуру;

– **обмеження за складних відносин.** Ефективність запропонованої архітектури може знижуватися в умовах складної топології даних. Зокрема, це стосується ситуацій поліієрархії, коли логіка системи вимагає підпорядкування одного дочірнього об'єкта одразу декільком батьківським вузлам.

Переваги ієрархічної моделі:

– **простота.** Легко зрозуміти та реалізувати;

– **висока продуктивність у базових ієрархіях.** Запропонований підхід демонструє максимальну ефективність при обробці нескладних багаторівневих систем. Він є оптимальним інструментом для моделювання інформаційних масивів, що мають природну деревоподібну топологію;

– **висока швидкість отримання інформації.** Завдяки впорядкованій ієрархічній архітектурі час відгуку системи значно скорочується. Ця перевага стає вирішальною в алгоритмах пошуку, що базуються на топологічному розміщенні вузла в дереві.

Недоліки ієрархічної моделі:

– **обмежені можливості для складних відносин.** Не підходить для представлення даних зі складними відносинами, де один елемент може належати кільком батькам;

– **повторення даних.** В окремих сценаріях використання цієї моделі виникає ризик появи надлишкових записів (redundancy). Цей недолік стає особливо відчутним при проєктуванні розгалужених та комплексних структур даних;

– **обмежена гнучкість.** Важко змінювати структуру моделі даних, якщо вона вже реалізована.

Приклади використання:

– **організаційні структури.** Ієрархічна модель може бути використана для представлення організаційної структури компанії, де співробітники підпорядковуються керівникам, а ті, у свою чергу, вищим керівникам;

– **організація файлових сховищ.** Архітектура сучасних операційних систем переважно базується на багаторівневій моделі. У такій системі директорії виступають контейнерами, що можуть інкапсулювати як підкаталоги, так і окремі масиви даних (файли).

У межах теорії корисності можна говорити про оцінювання функції корисності, з одного боку, за критерієм «Вигоди», та з іншого, за критерієм «Витрати». У першому випадку функція корисності є позитивною, у другому негативною. Обидві функції можна оцінити з допомогою методу аналізу ієрархій (MAI). В принципі, для їх оцінки можна обмежитися трирівневою структурою ієрархії «мета – критерії – альтернативи», але доцільно розглянути складнішу ієрархію, розщепивши другий рівень критеріїв на підкритерії. Розщеплення критеріїв (інакше – декомпозиція критеріїв) розглядається як метод поділу складних систем на частини, розгалуження шляхів або процесів. Виконаємо необхідну деталізацію.

Критерій «Вигоди» може бути, наприклад, розщеплений на такі підкритерії: «Економічні», «Соціальні», «Благоустрій міста» (рис. 3.1).

На рис. 3.1 числа у прямокутниках відображають пріоритети елементів ієрархії.

У вершині ієрархії знаходиться фокус – ціль ієрархії («Вигоди»), нижче – фактори верхнього рівня, нижні – це фактори нижнього рівня. Фактори нижнього рівня згруповані, що зменшує їх кількість у кожній підгрупі. Це полегшує роботу експертів. Найнижчий ярус ієрархії – альтернативи. У разі їх три: «Рік випуску ТЗ (комфорт)»; «Розмір ТЗ (сидячих місць)»; «Розмір ТЗ (загальна місткість)».

Визначимо фактори верхнього рівня таким чином: K_1 – час доставки пасажирів; K_2 – вартість перевезення; K_3 – частота відправлень ТЗ на маршрут; K_4 – місткість ТЗ; K_5 – комфорт; K_6 – естетика.

При аналізі факторів верхнього рівня слід враховувати, що, наприклад, зменшення K_1 може призвести до збільшення потоку транспорту (кількість виконаних рейсів на добу/тиждень/місяць) і таким чином може підвищити доходи

перевізників. І тут є економічна вигода. Також поживавлення перевезень вигідне населенню цього району міста, що призводить до соціальної вигоди.

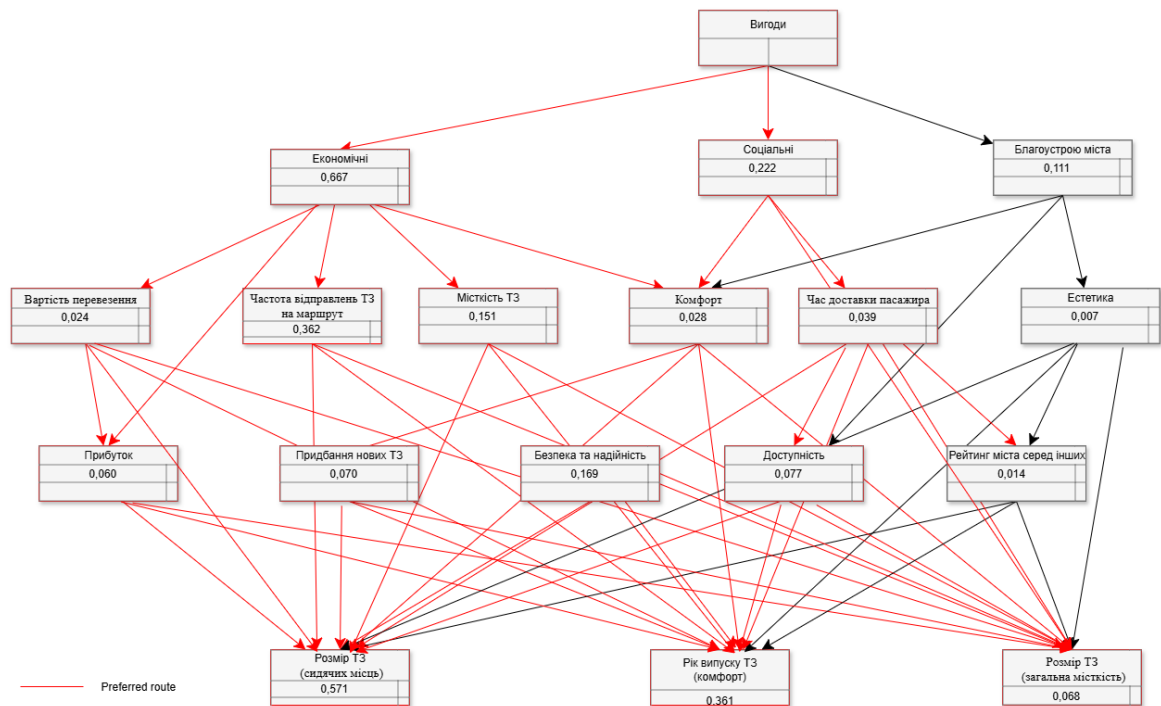


Рисунок 3.1 – Ієрархія факторів та альтернатив при аналізі критерія «Вигоди» багатокритеріального вибору транспортних засобів для міських пасажироперевезень

Під час розгляду чинників критерію «Витрати» необов'язково, щоб в ієрархії чинників витрат були такі самі елементи, як і критерію «Вигоди». Проте групи чинників витрат у цьому разі мають бути ті самі: економічні, соціальні, благоустрою міста.

Економічні витрати включають витрати трьох видів: капітальні вкладення; витрати, пов'язані з експлуатацією та поточним ремонтом, економічні наслідки закриття порому. Соціальні витрати є витрати суспільства: зміни способу життя; перевантаженість руху; вплив на суспільство переміщення людей (зміна комунікації), що також відноситься до соціальних витрат. Витрати, віднесені до підкритерію «Благоустрою міста», фокусуються на нівелюванні екологічних ризиків. Зокрема, йдеться про фінансування заходів щодо зменшення рівня

загазованості повітряного басейну та протидії загальній деградації довкілля в районі. Структурну схему зазначених залежностей наведено на рис. 3.2.

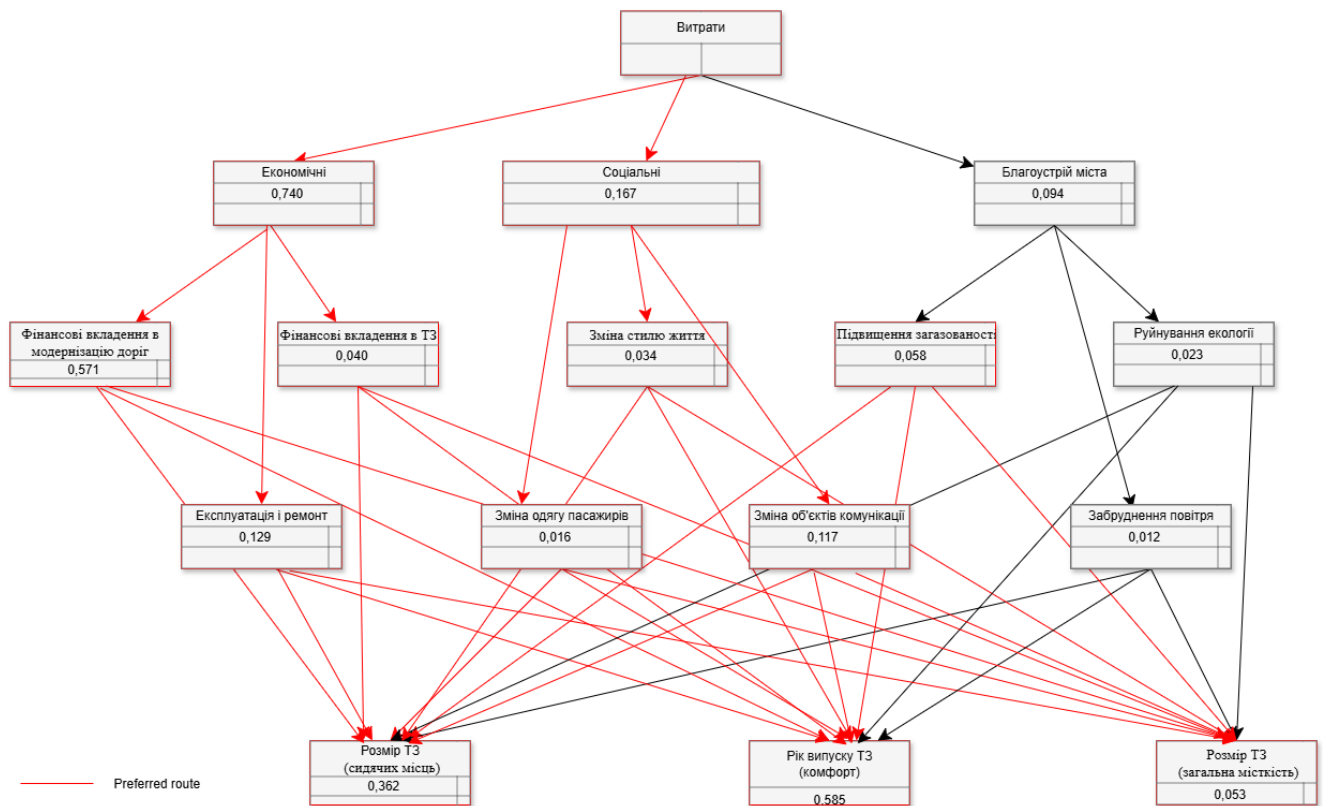


Рисунок 3.2 – Ієрархія факторів та альтернатив при аналізі критерія «Витрати» багатокритеріального вибору транспортних засобів для міських пасажироперевезень

Підсумовуючи етап формалізації задачі, слід зазначити, що для оцінки критеріїв вибору ТЗ було розроблено дві концептуальні моделі ієрархічного типу. Варто зауважити, що повний цикл аналізу в межах наведеного прикладу передбачає побудову чотирьох таких моделей, проте в даній роботі зацентровано увагу на ключових із них.

Після побудови ієрархії слід перейти до наступного етапу – оцінки пріоритетів в ієрархіях: за створеною ієрархією необхідно сформулювати матриці попарних порівнянь (МПП) [1]. Після цього експерт здійснює порівняння важливості елементів на всіх рівнях ієрархії за обраною шкалою відносин (груп факторів щодо мети, факторів щодо груп, альтернатив щодо факторів), розраховує пріоритети елементів на кожному рівні.

Розглянемо інтерпретацію пріоритетів. Оскільки в МАІ пріоритети носять характер об'єктивних ваг елементів, то можна стверджувати, що економічні вигоди з пріоритетом 0,667 утричі важливіші, ніж соціальні, і в шість разів важливіші за підкритерій «Благоустрій міста». Найбільший внесок у економічні вигоди забезпечує підкритерій «Частота відправлень ТЗ», найменший – «Час доставки пасажирів». З соціальних вигод найбільш важливою є «Безпека та надійність», а з вигод благоустрою міста – підкритерій «Доступність» послуги перевезення пасажирів усередині міста. Зауважимо, що на рис. 3.1 наведено не відносні пріоритети, а абсолютні, тобто, з урахуванням як ваги чинників групи, а й ваги групи чинників. Це дозволяє порівнювати пріоритети факторів різних груп. Оскільки всього факторів вигоди 11, слід виділяти ті з них, які перевищують середнє значення $1 : 11 = 0,09$, і з цієї точки зору найважливіші фактори – «Частота відправлень ТЗ на маршрут» (абсолютна вага 0,362), «Безпека і надійність» (0,169) і «Місткість». Підкритерій «Доступність» з вагою 0,077 є менш важливим фактором вигоди.

Аналогічно визначаються ваги найважливіших чинників критерію «Витрати». Оскільки кількість факторів критерію «Витрати» 9, то найбільш важливі ті, пріоритети яких перевищують значення $1:11=0,09$: фінансові вкладення в модернізацію доріг, витрати на експлуатацію та поточний ремонт, витрати, пов'язані зі зміною об'єктів комунікації

Пріоритети можна синтезувати, перемноживши відповідні матриці. Так, для пріоритетів альтернатив по сукупності всіх 11 факторів вигоди отримуємо: вектор $W_{\text{виг}} = (0,571; 0,361; 0,071)$, тобто підсумкові пріоритети вигоди варіантів вибору ТЗ для подачі на зупинку такі: за альтернативою «Розмір ТЗ (сидячих місць)» – 57 %, за альтернативою «Рік випуску ТЗ (комфорт)» – 36 %, за альтернативою «Розмір ТЗ (загальна місткість)» з урахуванням стоячих місць 7 %. Підсумкові пріоритети представлені на рис. 1 у вигляді чисел у відповідних прямокутниках-елементах ієрархії.

Аналогічно попередньому обчислюються пріоритети альтернатив за групами факторів для критерію «Витрати». За сукупністю всіх факторів витрат

маємо: $W_{\text{витр}} = (0,362; 0,585; 0,053)$. Таким чином, підсумкові пріоритети критерію «Витрати» варіантів вибору транспортних засобів для міських пасажироперевезень такі: подання ТЗ за альтернативою «Розмір ТЗ (сидячих місць)» – 36 %, за альтернативою «Рік випуску ТЗ (комфорт)» – 58 %, за альтернативою «Розмір ТЗ (загальна місткість)» – 5 %. Цей результат наведено у вигляді чисел у відповідних прямокутниках-елементах ієрархії (див. рис. 3.2).

Далі можна побудувати додаткові концептуальні ієрархічні моделі з метою вирішення завдання підбору оптимального типу ТЗ, характеристики якого відповідають необхідним для реального пасажиропотоку на конкретній зупинці. Зокрема, застосування методології *BOCR* передбачає інтеграцію до моделі таких аспектів, як «Можливості» (Opportunities) та «Ризики» (Risks). Фінальною фазою алгоритму, що реалізується після формування відповідних неорієнтованих графів ієрархічної структури, є процедура синтезу та ухвалення кінцевого рішення.

В цілому концептуальна ієрархічна модель даних є корисним інструментом для подання та організації даних, особливо коли дані мають чітку деревоподібну структуру. Однак, при роботі зі складними відносинами та великими обсягами даних можуть знадобитися гнучкіші моделі, наприклад, такі як мережева або реляційна модель [2].

3.1.2 Маргінальні моделі

Застосування маргінальної моделі, яка використовує поступове нарощування функціональності розробки (в даному випадку – оцінювання приросту пріоритетів), дозволяє синтезувати заключне рішення щодо вибору ТЗ, на основі обмеженої кількості даних – що знаходяться на «краю» (периферії) основної структури даних, – які є важливі для певних потреб або аналізу. У задачі, що вирішується, за маргінальної моделлю достатньо розглянути розподіл пріоритетів всього за двома критеріями «Вигоди» та «Витрати» (табл. 3.1). В останньому рядку табл. 3.1 наведено співвідношення пріоритетів критерію «Вигода» до критерію «Витрати», звідки слідує, що за цим критерієм слід віддати перевагу подачі на зупинку пасажирського транспорту (маршрутки),

що аналізується, за альтернативою «Розмір ТЗ (сидячих місць)» 1,58 проти 1,28 для альтернативи «Рік випуску ТЗ (комфорт)» та 0,62 для альтернативи «Розмір ТЗ (загальна місткість)» з урахуванням стоячих місць.

Таблиця 3.1 – «Вигоди» та «Витрати»

Показник	Варіант вибору за альтернативою		
	Розмір ТЗ (сидячих місць)	Рік випуску ТЗ (комфорт)	Розмір ТЗ (загальна місткість)
Пріоритет (вага) критерію «Вигода»	0,571	0,361	0,068
Пріоритет (вага) критерію «Витрати»	0,362	0,585	0,053
Співвідношення пріоритетів критерію «Вигода» до критерію «Витрати»	1,580	0,620	1,280

Такий же результат отримуємо по критерію «Витрати», тобто ранги переваг дорівнюють: «1» – альтернатива «Розмір ТЗ (загальна місткість)» (0,053); «2» – альтернатива «Розмір ТЗ (сидячих місць)» (0,362) й 3 – альтернатива «Рік випуску ТЗ (комфорт)» (0,585). Вигоди при цьому складають: альтернатива «Розмір ТЗ (загальна місткість)» – 0,068; альтернатива «Розмір ТЗ (сидячих місць)» – 0,571 та альтернатива «Рік випуску ТЗ (комфорт)» – 0,361. Отримуємо приріст для альтернативи «Розмір ТЗ (сидячих місць)» проти альтернативи «Розмір ТЗ (загальна місткість)»: по критерію «Вигоди» $0,571 - 0,068 = 0,503$; по критерію «Витрати» $0,362 - 0,053 = 0,309$. Відношення прирощень $0,503 : 0,309 = 1,63$ перевищує відношення 1,28 для альтернативи «Рік випуску ТЗ (комфорт)». Для альтернативи «Рік випуску ТЗ (комфорт)» маємо збільшення за критерієм «Вигода» $0,362 - 0,068 = 0,294$ та за критерієм «Витрати» $0,585 - 0,053 = 0,532$. Відношення прирощень $0,294 : 0,532 = 0,55$ менше відношення 1,28 для існуючого варіанта.

Таким чином, аналіз за відношенням ваг критеріїв «Вигоди» та «Витрати» на основі маргінальної моделі даних дозволяє зробити висновок, що в аналізованій ситуації найкраще подання на заповнену зупинку ТЗ за альтернативою «Розмір ТЗ (сидячих місць)». Цей висновок достатньо обґрунтований, оскільки проаналізовано фактори різної природи та спрямованості впливу: економічні, соціальні, благоустрою міста; позитивні та негативні.

3.1.3 Математичні моделі

Виходячи з розглянутих вище моделей, можна означити дві проблеми, виникають при вирішенні поставленої задачі:

- 1) для прийняття остаточного обґрунтованого рішення експертам необхідно мати не лише якісні характеристики, а й кількісні показники оцінювання;
- 2) у реальних умовах недостатньо двох критеріїв вибору.

З огляду на зазначені обставини доцільним є перехід від концептуальних підходів, зокрема ієрархічних моделей, що мають переважно описовий і якісний характер, до формалізованих математичних моделей, у яких застосовуються строгі рівняння та аналітичні залежності для кількісного відображення властивостей системи. Водночас результативним підходом вважається комплексне поєднання зазначених типів моделей у межах єдиного аналітичного процесу. Для збільшення кількості критеріїв вибору звернемося до моделі *BOCR*: *Benefits – Opportunities – Costs – Risks*.

Зазначена модель заснована на методі аналізу ієрархій професора Томаса Сааті [3]. Два з чотирьох зазначених аспектів моделі *BOCR* представлено окремою ієрархічною структурою і проаналізовано із використанням методу аналізу ієрархій (MAI).

У межах моделі *BOCR* спочатку враховуються позитивні складові, зокрема Вигоди (*Benefits*) та Можливості (*Opportunities*), а надалі — негативні чинники, представлені Витратами (*Costs*) й Ризиками (*Risks*). Кожен із зазначених аспектів впливає на якість прийнятого рішення та потребує окремого розгляду з використанням набору критеріїв, впорядкованих за пріоритетністю.

Такі критерії можуть застосовуватися для оцінки будь-яких інших рішень і мають бути ранжовані відповідно до конкретних завдань прийняття рішень. Після цього слід здійснити впорядкування альтернатив у межах кожної структури *BOCR* та виконати синтез узагальненого результату за формулою (3.1):

$$BOCR = \frac{Benefits \times Opportunities}{Costs \times Risks} = \frac{\text{Вигоди} \times \text{Можливості}}{\text{Витрати} \times \text{Ризики}}. \quad (3.1)$$

Таким чином, у межах аналізу враховуються як характеристики поточного стану досліджуваної проблеми, зокрема Вигоди та Витрати, так і прогностичні аспекти її розвитку, представлені Можливостями та Ризиками.

Слід підкреслити, що при порівнянні різних рішень, прийнятих на основі різних моделей, необхідно виходити з того, яка з альтернатив є більш дорогою або небезпечнішою (а не менш дорогою або менш небезпечною), тому що при попарних порівняннях оцінюється, у скільки разів домінуючий елемент пари перевершує менш кращий щодо властивостей. Інакше висловлюючись, пріоритети альтернатив по «Витратам» і «Ризикам» обчислюються як обернені величини значень, отриманих шляхом традиційної обробки ієрархій «Витрат» і «Ризиків». Відповідно до [3], такий підхід узгоджується з використанням фактичних вимірів (наприклад, у грошових одиницях) за декількома критеріями з подальшою інверсією заключного результату.

Тому у підрозділі 3.2 запропоновано вдосконалену модель на основі моделі *BOCR*, в якій виконується розщеплення (декомпозиція) основних чотирьох критеріїв (*Benefits – Opportunities – Costs – Risks*) на необхідну кількість підкритеріїв, що надає можливість експертам прийняти більш обґрунтоване рішення.

3.2 Формування групових рішень щодо організації подачі ТЗ на зупинки міського транспорту в умовах невизначеності та неповних даних

Слід зазначити, що задача вибору ТЗ в процесі логістичного забезпечення міських пасажироперевезень належить до класу задач умовної оптимізації, рішення яких є досить трудомістким, оскільки при збільшенні кількості експертів

буде збільшуватись обчислювальна складність. Питання обчислювальної складності в залежності від кількості альтернатив та критеріїв ретельно досліджено в роботі [4]. Коли для підтримки прийняття рішень застосовуються ЕО – що за визначенням є досить грубим наближенням, – недоцільно витрачати потужні обчислювальні ресурси на пошук точного розв'язку. Зважаючи на те, що потокова інформація з ІР-камер КС «розумне місто», яка перетворена у діаграму яскравості [5], надає не точні чисельні, а лише якісні оцінки наповненості зупинок міського транспорту у різні часи доби, це наближає до можливості використовувати зазначену інформацію в якості вхідних даних для синтезу групових рішень при розв'язанні задачі вибору ТЗ, що необхідно подати у вузлові точки мережі міських транспортних пасажироперевезень.

Задача полягає в синтезі групового рішення, враховуючі різні форми представлення вподобань експертів. Процедура знаходження групової думки експертів в умовах різних форм невизначеності може бути формально представлена у вигляді наступних послідовних етапів, наведених на рис. 3.3 .

Припустимо, що необхідно оцінити деяку множину альтернатив (вхідні дані, блок 2 на рис. 3.3) методом парних порівнянь. Знаходження групової думки експертів починається з побудови ієрархічної структури проблеми, яка містить декілька рівнів: цілі – критерії – альтернативи (блок 3 на рис. 3.3). В рамках цього етапу формується множина об'єктів експертизи (альтернатив)

$$\mathbf{A} = \{A_i | i = \overline{1, m}\} \quad (3.2)$$

та множина критеріїв

$$\mathbf{K} = \{K_q | q = \overline{1, s}\}. \quad (3.3)$$

В рамках етапу, відображеного у блоку 4 рис. 3.3, виконується процес виявлення пріоритетів об'єктів (критеріїв, альтернатив за критеріями). На цьому етапі для групи експертів $\mathbf{E} = \{E_j | j = \overline{1, t}\}$ визначаються експертні вподобання

$\mathbf{B} = \{B_j | j = \overline{1, t}\}$ та складаються матриці парних порівнянь для критеріїв і альтернатив відповідно до всіх встановлених критеріїв.

Після цього розраховується вектор пріоритетів МПП, враховуючи форму представлення оцінок експертами (блок 5).

Сформований експертом E_j профіль B_j відображає його вподобання та представляє його оцінки у вигляді зворотньосиметричної МПП виду (3.4):

$$B_j = \begin{bmatrix} 1 & b_{12} & \dots & b_{1i} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & 1 & \dots & b_{2i} & \dots & b_{2m} \\ \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots \\ b_{i1} & b_{i2} & \dots & 1 & \dots & b_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mi} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

де $b_{ij} = 1/b_{ji}, \forall i, j = \overline{1, m}; b_{ij}$ – вподобання експертів, сформовані в межах заданої шкали експертних переваг.

Якщо рівень узгодженості ЕО неприйнятний (відповідь «Ні» умовного оператора блоку 6), тоді з групи експертів $\mathbf{E}$ виділяється підгрупа з узгодженими оцінками, як буде розглянуто в підрозділі 3.3. Після цього всередині цих підгруп експертів виконується пошук об'єднаних оцінок (блок 7), після чого повторюється формування профілів вподобань $\mathbf{B}$ (блок 4), доки рівень узгодженості ЕО не стане прийнятним (відповідь «Так» умовного оператора блоку 6). Після цього виконується розрахунок кількісного показника якості кожної з альтернатив множини $\mathbf{A}$ (блок 8) на основі виразу:

$$U_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij},$$

де U_i – кількісний показник якості i -ї альтернативи;

w_j – вага j -го критерію;

r_{ij} – вага i -ї альтернативи для j -го критерію.

В результаті буде сформовано вектор

$$\mathbf{W} = \left\{ w_j \mid j = \overline{1, t} \right\}$$

з кількісними показниками якості кожної альтернативи $W_j = \{U_i^j | i = \overline{1, z}\}$ на основі суджень кожного j -го експерта (блок 9).

Таким чином, у лівій гілці блок-схеми рис. 3.3 відображено покрокову реалізацію методу МАІ, який використовує лише жорсткі оцінки альтернатив і не враховує можливість невизначеності у висновках експертів. Тобто, при складанні МПП (3.4) експертам заборонено давати відповіді на кшталт «не знаю» або «не впевнений».

Розглянемо ситуацію, коли експерти або підгрупи експертів $E \Rightarrow \{\{G_1\}, \{G_2\}, \dots, \{G_q\}\}$, $(G_q \subseteq E, \{G_q\} = \{E_1, \dots, E_r\}, t \geq r \geq 1)$, $t = |E|$ висловлюють свої вподобання з використанням різних форм представлення ЕО – нечітких, точкових та ін. ЕО (блок 10).

Наприклад, $E \Rightarrow \{\{G_1\}, \{G_2\}\}$. Експерти групи G_1 , користуючись методом попарного порівняння альтернатив, висловили точкові ЕО W_i та W_j (блок 11). Експерти групи G_2 сформуvalи нечіткі ЕО W_k та W_p (блок 12). Тобто наявна невизначеність в експертних судженнях, яка може бути представлена, наприклад, у вигляді нечітких та інтервальних чисел з формуванням та виведенням у якості результату вектору кількісних показників якості W^{rez} для кожної альтернативи, що відображає колективну думку групи експертів (блоки 13 та 14) за моделлю $BOCR$ (3.1).

Таким чином, виконано поєднання методу аналізу ієрархій (МАІ) з перевагами моделі $BOCR$ у процесі синтезу групових рішень, представлених у шкалах об'єктів нечислового характеру, в умовах багатокритеріальності та складних форм невизначеності. Використаний математичний апарат дозволяє коректно працювати з експертними свідченнями, сформованими в умовах невизначеності та неузгодженості, а також враховувати різні способи взаємодії експертних свідчень (перетин, об'єднання, поглинання), що виникають під час виявлення та аналізу експертної інформації.

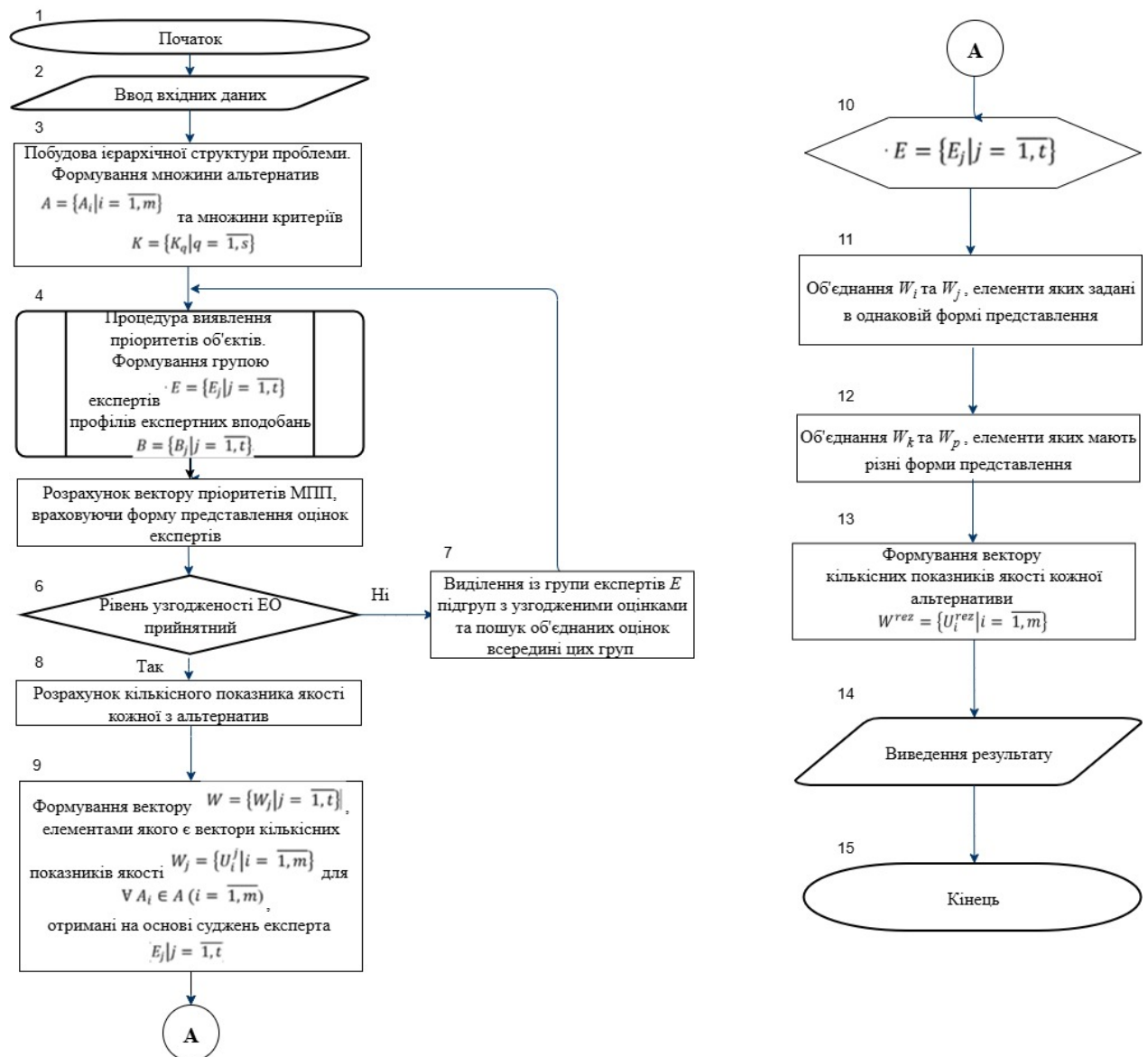


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритму знаходження групової думки експертів в умовах різних форм невизначеності

Розглянемо приклад вирішення задачі багатокритеріального вибору транспортних засобів міських пасажироперевезень з використанням моделі *BOCR* з урахуванням різних форм представлення вподобань експертів (нечіткі, точкові та ін. ЕО). З цієї метою введемо такі позначення:

а) критерії для аспекту «Вигоди»: K_1 – час доставки пасажирів; K_2 – вартість перевезення; K_3 – частота відправлень ТЗ на маршрут; K_4 – місткість ТЗ;

б) критерії для аспекту «Витрати»: K_5 – фінансові вкладення в модернізацію доріг; K_6 – фінансові вкладення в ТЗ; K_7 – вкладення у виробничо-технічну базу транспортних коридорів і вузлів;

в) критерії для аспекту «Можливості»: K_8 – пропускна здатність; K_9 – можливість доставки пасажирів в необхідну точку території; K_{10} – транспортні тарифи; K_{11} – погодні умови;

г) критерії для аспекту «Ризики»: K_{12} – ризик невиконання зобов'язань, пов'язаних із виконанням маршруту; K_{13} – ризик невиконання зобов'язань, пов'язаних із термінами доставки пасажирів.

Як альтернативи, що характеризують види транспорту для пасажироперевезення, виберемо наступні: A_1 – «Автомобіль – Рік випуску (комфорт)»; A_2 – «Автомобіль – Розмір (сидячих місць)»; A_3 – «Автомобіль – Розмір (загальна місткість)». Слід зазначити, що за різними умовами (віддаленості від центру, погоди, наявності «комендантської години» тощо) кінцеве ранжування альтернатив буде суттєво відрізнятися. Але, слід зауважити, що для кожного окремого рішення необхідно розглядати однаковий набір характеристик ТЗ. Хоча, наприклад, рік випуску (рівень комфортності) завжди буде перевагою, але у час пік на маршрутах робітничих перевезень перевагу може набути й місткість – в залежності від рішення експертів.

Крім того, сучасні умови потребують додавати у множину альтернативи, що враховують «інклюзивність» громадського транспорту. За прикладом м. Одеси, такі альтернативи мають окремий графік, який міський департамент транспорту вимушений щомісяця публікувати окремо [6]. Аналогічну роботу починає міська влада міст Миколаєва, Харкова [7]. Як показав аналіз, альтернативи інклюзії на теперішній час поширюються при виборі ТЗ в процесі логістичного забезпечення міських пасажироперевезень і в інших містах України, тому доцільно розглядати включення в перелік альтернативи «Автомобіль – Інклюзія (низька підлога, широкі двері)» з метою проведення ЕО. Тому рішення, що пропонуються, будуть набувати актуальності та потребувати подальшого розвитку.

Припустимо, що експертизу проводять два експерти. Експерт E_1 оцінює значимість одного об'єкту експертизи (альтернативи) по відношенню до іншого трикутним нечітким числом (ТНЧ):

$$\widetilde{a}_{ij} = (a_{ij}^1, a_{ij}^2, a_{ij}^3), \quad (3.5)$$

де a_{ij}^1 та a_{ij}^3 відповідно нижня та верхня границі інтервалу, на якому задана нечітка множина $\widetilde{a}_{ij}$; a_{ij}^2 – елемент множини $\widetilde{a}_{ij}$, для якого функція належності, що відповідає ступеню належності (істинності) елемента a_{ij}^2 до множини a_{ij} , дорівнює «1».

Тоді сукупність оцінок експерта E_1 може бути представлена у формі нечіткої МПП виду:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1; 1; 1) & \left(1; \frac{3}{2}; 2\right) \left(\frac{3}{2}; 2; \frac{5}{2}\right) & \left(2; \frac{5}{2}; 3\right) \\ \left(\frac{1}{2}; \frac{2}{3}; 1\right) & (1; 1; 1) \left(1; \frac{3}{2}; 2\right) & \left(\frac{5}{2}; 3; \frac{7}{2}\right) \\ \left(\frac{2}{5}; \frac{1}{2}; \frac{2}{3}\right) & \left(\frac{1}{2}; \frac{2}{3}; 1\right) (1; 1; 1) & \left(2; \frac{5}{2}; 3\right) \\ \left(\frac{1}{3}; \frac{2}{5}; \frac{1}{2}\right) & \left(\frac{2}{7}; \frac{1}{3}; \frac{2}{5}\right) \left(\frac{1}{3}; \frac{2}{5}; \frac{1}{2}\right) & (1; 1; 1) \end{bmatrix}.$$

Визначене у (3.5) ТНЧ сформоване в рамках вербальної шкали, що виражає ступінь переваги одного елемента над іншим [8] (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Трикутна нечітка шкала

Вербальна шкала	Трикутна нечітка шкала, $\widetilde{a}_{ij}$	Трикутна нечітка шкала, $\widetilde{a}_{ji} = 1/\widetilde{a}_{ij}$
Рівна значимість	(1; 1; 1)	(1; 1; 1)
Певна перевага значимості	(1/2; 1; 3/2)	(2/3; 1; 2)
Слабка значимість	(1; 3/2; 2)	(1/2; 2/3; 1)
Сильна значимість	(3/2; 2; 5/2)	(2/5; 1/2; 2/3)
Дуже висока значимість	(2; 5/2; 3)	(1/3; 2/5; 1/2)
Абсолютна значимість	(5/2; 3; 7/2)	(2/7; 1/3; 2/5)

Для знаходження вектора локальних пріоритетів на основі оцінок експерта E_1 скористаємось методом Чанга [9].

Розрахунки знаходження вектора локальних пріоритетів для всіх чотирьох аспектів моделі *BOCR* за критеріями K_1-K_{13} на основі оцінок експерта E_1 наведені в додатку Д.1.

За результатами розрахунків, наведених у додатку Д.1, сформуємо вектори пріоритетів (табл. 3.3), що отримані на основі оцінок експерта E_1 .

Таблиця 3.3 – Пріоритети, отримані на основі оцінок експерта E_1

Вигоди: $w_1^2 = (0,54; 0,22; 0,24);$	Витрати: $w_2^1 = (0,35; 0,45; 0,20);$
Можливості: $w_3^2 = (0,42; 0,37; 0,21);$	Ризики: $w_4^1 = (0,35; 0,52; 0,14).$

Експерт E_2 оцінив значимість одного об'єкту по відношенню до іншого точковими оцінками, сформованими в рамках вербальної шкали [10]: однакова значимість – 1, слабка перевага – 3 і т. п., абсолютна перевага – 9; 2, 4, 6, 8 – проміжні ступені переваги, між кожною градацією.

Для знаходження вектора локальних пріоритетів на основі оцінок експерта E_2 скористаємось методом геометричного середнього [10]. Така оцінка є найбільш характерною для шкал відношень:

$$\begin{aligned}
 (A_{ij}) &= \left[\begin{array}{l} \sqrt[m]{a_{11} \times a_{12} \times \dots \times a_{1m}} = d_1 \\ \sqrt[m]{a_{21} \times a_{22} \times \dots \times a_{2m}} = d_2 \\ \dots \\ \sqrt[m]{a_{m1} \times a_{m2} \times \dots \times a_{mm}} = d_m \end{array} \right] \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \{D = d_1 + d_2 + \dots + d_m\} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \left\{ \frac{d_1}{D} = \omega_1; \frac{d_2}{D} = \omega_2; \dots; \frac{d_m}{D} = \omega_m \right\} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m).
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Розрахунки знаходження вектора локальних пріоритетів для всіх чотирьох аспектів моделі *BOCR* за критеріями K_1-K_{13} на основі оцінок експерта E_2 наведені в додатку Д.2.

За результатами розрахунків, наведених у додатку Д.2, сформуємо вектор пріоритетів (табл. 3.4), отриманий на основі оцінок експерта E_2 .

Таблиця 3.4 – Пріоритети, отримані на основі оцінок експерта E_2

Вигоди: $w_1^2 = (0,41; 0,39; 0,20);$	Витрати: $w_2^2 = (0,54; 0,37; 0,09);$
Можливості: $w_3^2 = (0,35; 0,47; 0,18);$	Ризики: $w_4^2 = (0,26; 0,66; 0,08).$

Для отримання групового рішення скористаємось операцією комбінування ЕО (свідоцтв):

– аспект «Вигоди»:

Експерт 1: $m_1(A_1) = 0,54; m_1(A_2) = 0,22; m_1(A_3) = 0,24;$

Експерт 2: $m_2(A_1) = 0,41; m_2(A_2) = 0,39; m_2(A_3) = 0,20;$

– аспект «Витрати»:

Експерт 1: $m_1(A_1) = 0,35; m_1(A_2) = 0,45; m_1(A_3) = 0,20;$

Експерт 2: $m_2(A_1) = 0,54; m_2(A_2) = 0,37; m_2(A_3) = 0,09;$

– аспект «Можливості»:

Експерт 1: $m_1(A_1) = 0,42; m_1(A_2) = 0,37; m_1(A_3) = 0,21;$

Експерт 2: $m_2(A_1) = 0,35; m_2(A_2) = 0,47; m_2(A_3) = 0,18;$

– аспект «Ризики»:

Експерт 1: $m_1(A_1) = 0,35; m_1(A_2) = 0,52; m_1(A_3) = 0,14;$

Експерт 2: $m_2(A_1) = 0,26; m_2(A_2) = 0,66; m_2(A_3) = 0.$

Розрахуємо коефіцієнт конфліктності [11; 12]:

$$k_{12} = \sum_{j=1}^3 (m_1(A_j) \sum_{i=1, i \neq j}^3 m_2(A_i)). \quad (3.7)$$

Аспект «Вигоди»: $k_{12} = 0,65;$

Аспект «Витрати»: $k_{12} = 0,63;$

Аспект «Можливості»: $k_{12} = 0,56;$

Аспект «Ризики»: $k_{12} = 0,56.$

Беручи до уваги досить високий рівень конфлікту, для об'єднання (агрегування) ЕО скористаємося правилом пропорційного перерозподілу конфліктів № 5 (англ. *Proportional Conflict Redistribution Rule, PCR5*), що дозволяє здійснити перерозподіл конфліктних базових мас ймовірності на підмножини, що використані в локальних конфліктах [13; 14]:

$$m_{PCR5}(C) = m_{12}(C) + \sum_{\substack{Y \in D^A\{X\} \\ X \cap Y = \emptyset}} \left[\frac{m_1(X)^2 \times m_2(Y)}{m_1(X) + m_2(Y)} + \frac{m_2(X)^2 \times m_1(Y)}{m_2(X) + m_1(Y)} \right], \quad (3.8)$$

де $m_{12}(C)$ – комбінована маса ймовірності для підмножини $C = X \cap Y$, що розрахована на основі кон'юнктивного консенсусу.

Результуючі основні маси ймовірності у відповідності до правила *PCR5*:

– аспект «Вигоди»:

$$m_{12}(A_1) = 0,54; m_{12}(A_2) = 0,29; m_{12}(A_3) = 0,17;$$

– аспект «Витрати»:

$$m_{12}(A_1) = 0,49; m_{12}(A_2) = 0,42; m_{12}(A_3) = 0,09;$$

– аспект «Можливості»:

$$m_{12}(A_1) = 0,40; m_{12}(A_2) = 0,46; m_{12}(A_3) = 0,14;$$

– аспект «Ризику»:

$$m_{12}(A_1) = 0,26; m_{12}(A_2) = 0,69; m_{12}(A_3) = 0,05.$$

Враховуючи отримані значення, побудуємо таблицю відношень *BOCR* (табл. 3.5).

З розгляду табл. 3.5 видно, що з урахуванням значень розглянутих аспектів перевезень, отриманих в прикладі, кращої є альтернатива A_3 , яка відповідає мультимодальному перевезенню «Автомобіль – Розмір (загальна місткість)» [15].

Таблиця 3.5 – Значення відношення *BOCR*

Альтернативи	A_1	A_2	A_3	Ранжування альтернатив
Вигоди	0,54	0,29	0,17	$A_1 \prec A_2 \prec A_3$
Витрати	0,49	0,42	0,09	$A_1 \prec A_2 \prec A_3$
Вигоди/Витрати	1,10	0,69	1,89	$A_3 \prec A_1 \prec A_2$
Можливості	0,40	0,46	0,14	$A_2 \prec A_1 \prec A_3$
Ризики	0,26	0,69	0,05	$A_2 \prec A_1 \prec A_3$
Можливості/Ризики	1,54	0,67	2,80	$A_3 \prec A_1 \prec A_2$
Вигоди/(Витрати $\times$ Ризики)	4,24	1,00	37,78	$A_3 \prec A_1 \prec A_2$
<i>BOCR</i>	1,70	0,46	5,29	$A_3 \prec A_1 \prec A_2$

В роботі [13] наголошено, що правило *PCR5* є єдиним правилом, що забезпечує математично обґрунтований пропорційний перерозподіл на підмножини, залучені в локальні конфлікти. Але, при роботі з трьома або більше джерелами інформації (експертами) слід розглянути альтернативи, такі як *PCR6*, для досягнення оптимальної продуктивності системи [14].

3.3 Виділення підгруп експертів на основі узгодженості оціночних суджень

3.3.1 Методи розв'язання задачі формування структури групи експертів

Залучення експертних опитувань може зумовлювати варіативність отриманих результатів, оскільки частина фахівців орієнтована на активне генерування нових ідей, тоді як інші переважно здійснюють критичну оцінку вже запропонованих рішень. У межах традиційних дискусій представники цих двох груп зазвичай взаємодіють одночасно, що нерідко призводить до зниження ефективності обговорення.

У контексті досліджуваної задачі роль експертів виконують диспетчери МПТ, які представляють адміністративні структури органів місцевого

самоврядування, відповідальні за управління бізнес-процесами в межах концепції «розумного міста», а також диспетчерський персонал локальних підрозділів компаній-перевізників.

Унаслідок розбіжностей між індивідуальними експертними судженнями в межах сукупності оцінок знижується їх однорідність, що негативно впливає на рівень узгодженості результатів. За таких умов актуалізується необхідність поділу групи експертів на декілька підгруп, у межах яких значення оцінок є близькими за змістом і ступенем узгодження, з метою подальшого детального аналізу та визначення узагальненої агрегованої оцінки [16].

При вирішенні вказаної задачі та вибору відповідних методів її рішення слід враховувати наступні чинники [17]:

- вид шкали експертних вимірювань (номінальна, порядкова, абсолютна, інтервальна та ін.);
- обмеженість кількості експертів n ($n \leq 30$) в групах; різні види НЕ-факторів (неповнота, невизначеність, нечіткість, недостовірність, неоднозначність та ін.), під впливом яких формуються і обробляються експертні свідчення.

Існує широкий вибір моделей і методів, які можна використовувати для управління роботою у проєктних командах [18–20].

Дослідження підходів, придатних для розв’язання задачі структуризації, тобто поділу сукупності групових ЕО на підмножини з певною мірою однорідності, засвідчило, що їх практичне застосування не завжди є достатньо ефективним. Зокрема, для аналізу ЕО, поданих у числових шкалах (абсолютних або бальних), найбільшого поширення набули такі підходи:

- методи кластерного аналізу, що базуються на використанні різноманітних метрик відстані, зокрема Евклідової, Мангеттенської, Чебишевської та інших;
- процедури кластеризації, побудовані з використанням методів математичного програмування, зокрема динамічного та цілочисельного;

– підходи до групування, які ґрунтуються на оцінюванні функцій щільності ймовірнісного розподілу.

Для аналізу ЕО, сформованих у шкалах порядку або відношень, доцільним є застосування методів кластеризації нечислових даних, зокрема методу медіани Кемені [21]. При цьому важливо враховувати можливу структуру експертних свідочств (узгоджені, сумісні, довільні тощо), а також потенційні способи їх взаємодії, зокрема перетин, об'єднання або поглинання. Для підвищення ефективності розв'язання зазначеної задачі перспективним є використання метрик, запропонованих у межах теорії свідочств Демпстера–Шефера [22; 23]. Для покращення вимірювання конфліктів у межах системи Демпстера–Шефера необхідно вдосконалювати існуючі та розроблювати нові алгоритми кількісної оцінки міжекспертної схожості та встановлення порогів консенсусу [24]. Безумовно, при існуванні великих множин групових ЕО обчислення заходів довіри може виявитися громіздким [25]. Але слід враховувати, що правило Демпстера використовує суб'єктивні ймовірності на відміну від об'єктивних ймовірностей при застосуванні теореми Байеса, тому обчислювальні витрати будуть значно меншими.

Метою дослідження є синтез математичної моделі управління невизначеностями шляхом подальшого розвитку методу групових ЕО з використанням метрик теорії свідочств та розробка інноваційної інформаційно-комп'ютерної технології (ІКТ) підтримки прийняття рішень з реалізацією зазначеного методу у складі автоматизованої системи подачі міського автотранспорту на основі визначення рівня наповненості зупинок пасажирями за даними ІР-відеоспостереження комп'ютерної системи «розумне місто».

3.3.2 Математична модель формування підгруп експертів

Нехай задано множину альтернатив $\mathbf{A} = \{A_i \mid i = \overline{1, n}\}$ та сукупність експертів $= \{E_j \mid j = \overline{1, t}\}$, які залучені до проведення ЕО (див. підрозділ 3.2). За підсумками ЕО формується система підмножин $\mathbf{B} = \{B_j \mid j = \overline{1, t}\}$, де кожна

підмножина $B_j \in 2^A$ -вимірним вектором, що відображає індивідуальні переваги або вибір експерта E_j . Кожен елемент x_j цього вектора визначається відповідно до задалегідь установленної системи правил виду (3.10):

$$\begin{cases} x_j = \{\emptyset\}; \\ x_j = \{\omega_i\} - \text{експертом обрано (оцінено) один елемент } \omega_i \in \Omega; \\ x_j = \{\omega_i \mid i = \overline{1, k}\}, k < n - \text{експертом виділено } k \text{ елементів } \omega_i \in \Omega; \\ x_j = \Omega = \{\omega_i \mid i = \overline{1, n}\} - \text{у експерта виникли труднощі із оцінюванням} \\ \text{вибором (всі елементи множини } \Omega \text{ рівнозначні)}, \end{cases} \quad (3.10)$$

де $\emptyset$ – порожня множина;

Ω – сукупність всіх можливих підмножин;

ω_i – підмножина множини Ω .

В межах загальної множини ЕО потрібно здійснити виокремлення таких підгруп експертів $E \Rightarrow \{G_1\}, \{G_2\}, \dots, \{G_j\}, \dots, \{G_t - 1\} (G_p \subseteq E, \{G_p\} = \{E_1, \dots, E_r\}, t \geq r \geq 1)$, які характеризуються близькістю поглядів та узгодженістю експертних суджень. Окрім того, необхідно ідентифікувати експертів E_j , що не входять до жодної з виділених підгруп, тобто випадки, коли $E_j \subseteq G_k$ за умови $|G_k| = 1$ (за наявності таких ситуацій).

Будемо вважати, що експертні свідчення, які потрапили до однієї групи $E_j \subseteq G_p, t \geq j \geq 2$ є узгодженими; експертні свідчення $E_j \subseteq G_k, |G_k| = 1$ є нетиповими, тобто такими, що відрізняються (конфліктують) від решти оцінок експертів. Якщо виникає ситуація, при якій утворюється t підгруп, таких, що $\forall G_j: |G_j| = 1 (i = \overline{1, n})$, то немає сенсу проводити подальшу обробку (аналіз) оцінок експертів.

Для вирішення поставленої задачі, застосуємо підхід, що полягає в наступному. Поділ експертної комісії на підгрупи, всередині яких думки експертів можуть бути признані узгодженими, відбувається в два послідовних етапи. На першому етапі попарно оцінюється схожість d експертних свідчень m на основі обраних метрик теорії свідчень (додаток В). Отримані дані подаються у вигляді матриці попарних відстаней, що має симетричну структуру відносно головної діагоналі та має вигляд:

$$\begin{bmatrix} - & d(m_1, m_2) & \dots & d(m_1, m_t) \\ d(m_1, m_2) & - & \dots & d(m_2, m_t) \\ \dots & \dots & - & \dots \\ d(m_2, m_t) & d(m_2, m_t) & \dots & - \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

де $d(m_i, m_j) = d(m_j, m_i)$;

$\forall i, j = \overline{1, t}; i \neq j$;

t – кількість порівнюваних елементів (об'єктів); $d(m_i, m_j)$ – відповідні значення однієї з метрик, наведених в додатку Г.

Добір метрики (додаток В) є одним із ключових чинників, що визначають результати кластеризації початкової множини експертних свідочств та утворення підгруп експертів із близькими за змістом оцінками. Зазвичай вибір метрики має певну частку суб'єктивності й здійснюється експертом-аналітиком самостійно, з урахуванням його професійного досвіду та практичних міркувань.

На другому етапі формуються підгрупи експертів $G_p \subseteq E; p = \overline{1, t}$. Результируючі підгрупи експертів формуються таким чином, що $E_j \subseteq G_p; j = \overline{1, r}; t \geq r \geq 1$ виконується умова $\forall i, j = \overline{1, t}; i \neq j; l_{p-1} < d(m_i, m_j) \leq l_p$, де l_{p-1}, l_p – деякі заздалегідь відомі порогові значення, які відповідають за приналежність експерта E_j до підгрупи G_p .

Розглянемо приклад практичного застосування запропонованого підходу. Припустимо задана множина вихідних даних (альтернатив) $A = \{A_i | i = \overline{1, n}\}; n = 4$ і група експертів $E = \{E_j | j = \overline{1, t}\}; t = 10$. За результатами проведення експертного опитування сформувалась система підмножин $X_j = \{B_i | i = \overline{1, s}\}; s = 2^{|A|}$, що відображає вибір експертів (експертні переваги, свідочства). Розглянемо ситуацію при якій експертні свідочства задовольняють умові

$$X_1 = X_2 = \dots X_j = \dots = X_m; X_j = 1; \forall j = \overline{1, m}, \quad (3.12)$$

тобто, всі експерти обрали одну й ту саму альтернативу, як кращий вибір, і визнані еквівалентними $B_1 = \{a_1\}$, $B_2 = \{a_2\}$, $B_3 = \{a_3\}$, $B_4 = \{a_4\}$. Результати експертного опитування наведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Основні маси ймовірності виділених підмножин $m_j(A_i)$

Експерт E_j	$m_j(A_1)$	$m_j(A_2)$	$m_j(A_3)$	$m_j(A_4)$
E_1	0,1	0,5	0,3	0,1
E_2	0,2	0,3	0,4	0,1
E_3	0,3	0,2	0,2	0,3
E_4	0,5	0,1	0,1	0,3
E_5	0,1	0,1	0,6	0,2
E_6	0,1	0,3	0,2	0,4
E_7	0,3	0,1	0,4	0,2
E_8	0,3	0,3	0,3	0,1
E_9	0,1	0,2	0,1	0,6
E_{10}	0,1	0,6	0,2	0,1

Сформуємо набір метрик $Q = \{Q_i \mid i = \overline{1, k}\}; k = 5$, на основі якого дослідимо ступінь відмінності експертних свідочств, та чутливість показника ступеню відмінності (близькості) між групами експертних свідочств m_1 та m_2 до застосованої метрики. Дослідимо можливість застосування наступних метрик відстані, які використовуються в аналізі даних, зокрема для порівняння наборів даних чи об'єктів:

а) k_1 – відстань Джоссельме, що використовується в задачах класифікації та кластеризації, де потрібно порівняти схожість або відмінність членства об'єктів у множинах [28–30; 34];

б) k_2 – відстань Евкліда, що вимірює пряму відстань між двома точками у багатовимірному просторі [31];

в) k_3 – відстань Ванга, що враховує як ступінь належності, так і область невизначеності, та є більш чутливою до форм нечітких множин [33];

г) k_4 – відстань Бхаттачарія, що є мірою подібності (або відмінності) між двома розподілами ймовірностей та використовується для порівняння

гістограм та вимірювання, наскільки два розподіли перекриваються. Тісно пов'язана з індексом Бхаттачарія, який оцінює схожість [30; 32];

д) k_5 – відстань Тессема, що використовується для оцінки розбіжності між двома базовими призначеннями ймовірності [26; 27].

Для визначення порядку групування метрик відстані скористаємося методом дальнього сусіда та аналітичними виразами, наведеними в додатку Г.

Розрахуємо метрики (Г.1)–(Г.6) для оцінювання відмінностей між групами експертних свідочств.

Квадратна матриця (порядку 10) попарних відстаней, отриманих на основі метрики (Г.5) – відстань Бхаттачарія, – для системи підмножин **B**, сформованих групою експертів на множині **A**, наведена в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Попарне представлення значень метрики $d_B(mk, mj)$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	–	0,158	0,304	0,454	0,333	0,260	0,340	0,199	0,407	0,086
2	0,158	–	0,232	0,371	0,232	0,275	0,201	0,093	0,411	0,227
3	0,304	0,232	–	0,173	0,307	0,188	0,175	0,192	0,247	0,327
4	0,454	0,371	0,173	–	0,432	0,340	0,260	0,305	0,333	0,466
5	0,333	0,232	0,307	0,432	–	0,312	0,192	0,296	0,409	0,409
6	0,260	0,275	0,188	0,340	0,312	–	0,296	0,286	0,154	0,275
7	0,340	0,201	0,175	0,260	0,192	0,296	–	0,197	0,373	0,397
8	0,199	0,093	0,192	0,305	0,296	0,286	0,197	–	0,405	0,240
9	0,407	0,411	0,247	0,333	0,409	0,154	0,373	0,405	–	0,409
10	0,086	0,227	0,327	0,466	0,409	0,275	0,397	0,240	0,409	–

Розрахуємо значення міри (3.13), що відображає ступінь конфлікту між експертом E_j та рештою $(t - 1)$ експертів $\mathbf{E} \setminus E_j$ [33]:

$$Conf(i, \mathbf{E}) = \frac{1}{t-1} \sum_{i=1; i \neq j}^t Conf(i, j), \quad (3.13)$$

де $\mathbf{E} = \{E_j \mid j = \overline{1, t}\}$ – група експертів, які залучені в конфлікт з експертом E_i .

Результати розрахунків наведені у табл. 3.8.

Аналізуючи дані табл. 3.8, можна дійти до висновку, про те, що незалежно від обраної метрики, свідoctва експерта E_9 є самими конфліктними по відношенню до свідoctв решти експертної групи (рівень конфлікту між експертом E_9 та рештою експертної групи коливається в діапазоні $[0,35; 0,53]$, в залежності від застосованої метрики, та його значення є суттєвим).

Метрика (Г.6) – відстань Ванга – виділяє експерта E_4 з таким самим показником рівня конфлікту як і у E_9 . Найменш конфліктними по відношенню до решти групи експертів признані оцінки експерта E_3 , рівень конфлікту коливається в діапазоні $[0,238; 0,339]$ (окрім метрики (Г.1) – відстані Тессема). Метрика (Г.6) виділяє експертів E_3 , E_8 з найменшим рівнем конфлікту; метрика (Г.1) – експертів E_2 та E_8 .

Таблиця 3.22 – Значення міри $Conf(E_j, E)$

$Conf(E_j, E)$	Відстань Джоссельме	Відстань Евкліда	Відстань Ванга	Відстань Бхаттачарія	Відстань Тессема
$Conf(E_1, E)$	0,290	0,411	0,344	0,282	0,311
$Conf(E_2, E)$	0,245	0,347	0,300	0,244	0,256
$Conf(E_3, E)$	0,240	0,339	0,289	0,238	0,267
$Conf(E_4, E)$	0,350	0,496	0,433	0,348	0,356
$Conf(E_5, E)$	0,349	0,493	0,378	0,325	0,378
$Conf(E_6, E)$	0,267	0,377	0,311	0,265	0,289
$Conf(E_7, E)$	0,266	0,377	0,322	0,270	0,289
$Conf(E_8, E)$	0,241	0,341	0,289	0,246	0,256
$Conf(E_9, E)$	0,375	0,530	0,433	0,350	0,422
$Conf(E_{10}, E)$	0,343	0,485	0,367	0,315	0,378

Результуючі підгрупи експертів формувалися за умови $0 < d(m_k, m_j) \leq 0,3$, що передбачає низький рівень відмінності між групами свідoctв m_k та m_j , і дозволяє зробити припущення про те, що всередині виділених підгруп оцінки експертів є узгодженими.

За результатами сформованого розбиття вихідної сукупності оцінок групи експертів $E = \{E_i \mid i = \overline{1, t}\}$ виділені наступні підгрупи експертів:

1) відстань Джоссельме:

$G_1 = \{E_2, E_5, E_7, E_8\}$ – при формуванні групи максимальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп $\{E_2, E_7, E_8\}$ та $\{E_5\}$, та сягає значення $d_J(m_k, m_j) = 0,3$; мінімальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп $\{E_2\}$ та $\{E_8\}$ при $d_J(m_i, m_j) = 0,1$.

$G_2 = \{E_1, E_{10}\}$ – ступінь відмінності сягає значення $d_J(m_k, m_j) = 0,1$.

$G_3 = \{E_3, E_4\}$ та $G_4 = \{E_6, E_9\}$ – ступінь відмінності сягає значення $d_J(m_k, m_j) = 0,173$;

2) відстань Евкліда:

$G_1 = \{E_2, E_7, E_8\}$ – при формуванні групи максимальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп $\{E_2, E_8\}$ та $\{E_7\}$, та сягає значення $d_E(m_k, m_j) = 0,245$.

$G_2 = \{E_1, E_{10}\}$ – ступінь відмінності сягає значення $d_E(m_k, m_j) = 0,141$.

$G_3 = \{E_3, E_4\}$ та $G_4 = \{E_6, E_9\}$ – ступінь відмінності сягає значення $d_E(m_k, m_j) = 0,245$.

$G_5 = \{E_5\}$ – найближчою підгрупою є $\{E_2, E_7, E_8\}$, $d_E(m_{G1}, m_{G5}) = 0,424$;

3) відстань Ванга:

$G_1 = \{E_2, E_7, E_8\}$ – при формуванні групи максимальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп $\{E_7\}$ та $\{E_2, E_8\}$, та сягає значення $d_W(m_k, m_j) = 0,2$.

$G_2 = \{E_1, E_{10}\}$ – ступінь відмінності сягає значення $d_W(m_k, m_j) = 0,1$.

$G_3 = \{E_3, E_4\}$ та $G_4 = \{E_6, E_9\}$ – ступінь відмінності сягає значення $d_W(m_k, m_j) = 0,2$; об'єднання цих підгруп може бути здійснено при $d_W(m_k, m_j) = 0,4$.

$G_5 = \{E_5\}$ – найближчою підгрупою є підгрупа $\{E_1, E_{10}\}$, $d_E(m_{G2}, m_{G5}) = 0,4$;

4) відстань Бхаттачарія:

$G_1 = \{E_1, E_2, E_8, E_{10}\}$ – при формуванні групи максимальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп $\{E_1, E_{10}\}$ та $\{E_2, E_8\}$, та сягає значення $d_B(m_i, m_j) = 0,24$; мінімальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп $\{E_2\}$ та $\{E_8\}$ при $d_B(m_i, m_j) = 0,086$.

$G_2 = \{E_5, E_7\}$ – ступінь відмінності сягає значення $d_B(m_i, m_j) = 0,192$.

$G_3 = \{E_3, E_4\}$ – ступінь відмінності сягає значення $d_B(m_i, m_j) = 0,173$.

$G_4 = \{E_6, E_9\}$ – ступінь відмінності сягає значення $d_B(m_i, m_j) = 0,154$;

5) відстань Тессема:

$G_1 = \{E_2, E_3, E_4, E_7, E_8\}$ – при формуванні групи максимальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп $\{E_2, E_3, E_7, E_8\}$ та $\{E_4\}$, та сягає значення $d_T(m_i, m_j) = 0,3$; мінімальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп $\{E_2\}$ та $\{E_8\}$ при $d_T(m_i, m_j) = 0,1$.

$G_2 = \{E_1, E_{10}\}$ – ступінь відмінності сягає значення $d_T(m_i, m_j) = 0,1$.

$G_3 = \{E_6, E_9\}$ – ступінь відмінності сягає значення $d_T(m_i, m_j) = 0,2$.

$G_4 = \{E_5\}$ – ступінь відмінності між $\{E_5\}$ та $\{E_1, E_2, E_3, E_4, E_6, E_7, E_8\}$ сягає значення $d_T(m_i, m_j) = 0,5$.

За результатами отриманих даних можна дійти до висновку, що незалежно від застосованої метрики, відокремлюється підгрупа $\{E_6, E_9\}$ зі значенням ступеню відмінності, який коливається у межах від 0,154 до 0,245 (в залежності від обраної метрики). Результати, отримані за метриками (Г.4) – відстань Евкліда – та (Г.6) – відстань Ванга, – співпадають. Відмінність полягає у кількісних значеннях показника $d(m_i, m_j)$ для цих метрик.

Метрики (Г.2), (Г.4), (Г.5) та (Г.6) виділяють підгрупу $\{E_3, E_4\}$ зі значенням ступеню відмінності, який коливається в межах від 0,173 до 0,245 (в залежності від обраної метрики). Метрика (Г.1) відносить цю підгрупу до підгрупи $\{E_2, E_3, E_4, E_7, E_8\}$:

– $\{E_4\}$ об'єднується із $\{E_2, E_3, E_7, E_8\}$ при $d_T(m_i, m_j) = 0,3$;

– $\{E_3\}$ об'єднується із $\{E_2, E_7, E_8\}$ при $d_T(m_i, m_j) = 0,2$.

Метрики (Г.1), (Г.2), (Г.4) та (Г.6) виділяють підгрупу $\{E_1, E_{10}\}$ зі значенням ступеню відмінності, який коливається в межах від 0,1 до 0,141 (в залежності від обраної метрики). Метрика (Г.5) відносить підгрупу $\{E_1, E_{10}\}$ до підгрупи $\{E_1, E_2, E_8, E_{10}\}$: $\{E_1, E_{10}\}$ та $\{E_2, E_8\}$ об'єднуються при $d_B(m_i, m_j) = 0,24$.

Метрики (Г.1), (Г.4) та (Г.6) виділяють підгрупу $\{E_5\}$ зі значенням ступеню відмінності, який коливається в межах від 0,4 до 0,5 (в залежності від обраної метрики).

Таким чином, при встановлених граничних значеннях $d(m_k, m_j)$, експертна комісія була розбита на ряд підгруп $E \Rightarrow \{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5\}$, які містять близькі, в певному сенсі, значення, де $G_1 = \{E_2, E_7, E_8\}$; $G_2 = \{E_1, E_{10}\}$; $G_3 = \{E_3, E_4\}$; $G_4 = \{E_6, E_9\}$; $G_5 = \{E_5\}$. В аналізованому прикладі граничне значення, що відповідає за оптимальну кількість підгруп, $d(m_k, m_j)$ було прийнятим 0,3, що, в свою чергу, передбачає низький рівень відмінності між групами експертних свідочств m_k та m_j , всередині виділеної групи G_i [34].

Інформаційне забезпечення моделювання розподілу транспортних потоків у міських проектах сприяє досягнення цілей сталого розвитку, визначених у Програмі ООН до 2030 р. [35]. При формуванні потоків МПТ важливо визначення комплексного показника якості під час виконання поїздок у проектах громадського транспорту значень вагових коефіцієнтів окремих показників якості для елементів поїздки [36]. Відбір кандидатів у експерти з визначення ТЗ на маршрути необхідно здійснювати з використанням методу багатокритеріального відбору на основі нечітких коефіцієнтів важливості до такої групи експертів [37].

Висновки до розділу 3

У третьому розділі проаналізовано сучасні моделі визначення найкращих альтернатив у процесі багатокритеріального аналізу вибору транспортних засобів для міських пасажирських перевезень.

Розглянуто процеси побудови та прийняття рішень на основі концептуальних ієрархічних, маргінальних (з обмеженнями за двома критеріями) і багатокритеріальних математичних моделей.

Розглянуті вище моделі враховують сприятливі аспекти рішення, які очікуються з високою ймовірністю, які є вигодами (*Benefits*), а також несприятливі – витрати (*Costs*). Спільне застосування чотирьох аспектів у аналізі

рішень розглядається як модель *BOCR*: *B* – *Benefits* (Вигоди), *O* – *Opportunities* (Можливості), *C* – *Costs* (Витрати), *R* – *Risks* (Ризики), – засновану на методі аналізу ієрархій Т. Сааті.

В Розділі 3 запропоновано вдосконалену модель, в якій виконується розщеплення основних критеріїв на підкритерії, кількість та зміст яких може варіюватись в залежності від зміни оточуючих умов та виникаючих додаткових проблем.

Виконано подальший розвиток методу аналізу ієрархій (MAI) шляхом поєднання з перевагами моделі *BOCR* у процесі синтезу групових рішень для розв’язання задачі вибору транспортних засобів при логістичному забезпеченні міських пасажироперевезень. Доведено, що комбіноване використання багатьох критеріїв та моделей забезпечує більшу обґрунтованість отриманих висновків та прийнятих рішень.

Для об’єднання групових експертних оцінок (ЕО) запропонований метод, що дозволяє синтезувати колективне рішення різних підгруп експертів, враховуючи різні способи представлення вподобань експертів (нечіткі, точкові та ін. оцінки). Даний метод дозволяє моделювати невизначеності, які породжуються суперечливими експертними свідченнями, і не накладає жорстких обмежень на спосіб подання ЕО. На відміну від наявних, запропонований метод забезпечує обробку експертних суджень будь-якої структури: узгоджених, еквівалентних, довільних тощо. Він також враховує можливі об’єднання та перетини експертних свідчень.

Таким чином, в результаті досліджень запропонована математична модель управління невизначеностями у системі підтримки прийняття рішень для організації бізнес-процесу пасажирських перевезень міським автотранспортом шляхом подальшого розвитку методу групових ЕО з використанням метрик теорії свідочств, що дозволяє коректно працювати з експертними свідченнями, сформованими в умовах багатокритеріальності та складних форм невизначеності.

Робота виконана за підтримки Міністерства освіти та науки України в межах держбюджетної науково-дослідної роботи № держ. реєстрації 0117U007144 (додаток А.1).

Результати досліджень третього розділу опубліковані в роботах [5; 15; 34].

Список використаних джерел до розділу 3

1. Nedashkovskaya N. I. Investigation of methods for improving consistency of a pairwise comparison matrix. *Journal of the Operational Research Society*, 2018. Vol. 69, is. 12. P. 1947–1956. DOI: 10.1080/01605682.2017.1415640.
2. Lopes F., Gil J., Stavroulaki G. Towards a configurational multimodal urban network model: A data-driven approach to public transport modelling. *Proceedings of the 14th International Space Syntax Symposium*, Nicosia, Cyprus, 2024. P. 1471–1486. DOI: 10.36158/979125669032967.
3. Saaty T. L., Vargas L. G. Decision making with the analytic network process. 2nd Ed. Springer, 2013. 564 p.
4. Горпенко Д. Р., Болтъонков В. О. Порівняльний аналіз методів розв’язання оперативних задач транспортної логістики. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2023. Т. 13, № 1–2. С. 34–47. DOI: 10.15276/imms.v13.no1-2.34.
5. Буренко В. О. Інформаційні технології аналізування потреби та управління транспортними пасажиропотоками в smart-city. *Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій* : матеріали XXIII Всеукр. наук.-техн. конф. / Одес. нац. технолог. ун-т, Одеса, 20–21 квітня 2023 р. Одеса : Вид-во ОНТУ, 2023. С. 207–208. URL: <https://card-file.ontu.edu.ua/items/0e304d93-0867-4813-87b5-f4a6e7ef2826> (дата звернення: 18.12.2025).
6. В Одесі оприлюднили розклад інклюзивних міських автобусів на грудень. *Пасажирський транспорт* : вебсайт. Опубл. 29.11.2024. URL: <https://traffic.od.ua/news/busua/1260839> (дата звернення: 10.07.2025).

7. Автобус. Міські маршрути. Mercedes-Benz O530 Citaro. *Харків транспортний* : вебсайт. Опубл. 13.06.2025. URL: https://gortransport.kharkov.ua/ps_models/449/ (дата звернення: 18.07.2025).
8. Saaty T. L., Wei L. Complete structural functions and connections of the nervous system. RWS Publications, 2023.
9. Zhu K.-J., Jing Yu., Chang D. Y. A discussion on extent analysis method and applications of fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*. Feb. 1999. Vol. 116, No. 2. P. 450–456. DOI:10.1016/S0377-2217(98)00331-2.
10. Saaty T. L., Ozdemir M. S., Cillo B., Vargas L. G., Tavana M. Encyclicons – Dictionaries of complex ANP decision models. RWS Publications, 2021. 390 p.
11. Wang S., Zhu X., Shang P., Liu W., Lin X. Two-Echelon Pickup and delivery problem using public transport in city logistics. *Journal of Advanced Transportation*. Aug 2024. ID 1203246. P. 1–22. DOI: 10.1155/2024/1203246.
12. Vinogradova-Zinkevič I. Comparative sensitivity analysis of some fuzzy AHP methods. *MDPI. Mathematics*. Dec. 2023. Vol. 11, Is. 24, no. 4984. P. 1–39. DOI: 10.3390/math11244984.
13. Ding J. J., Li L. J., Xu H. B., Lv J. J. Adaptive fusion algorithm with DST and PCR5. *Conference: IET International Radar Conference*, January 2015. DOI: 10.1049/cp.2015.1009.
14. Швед А. В. Розробка методики оцінювання значень функції належності на основі групової експертизи у методі нечіткого дерева рішень. *Радіoeлектроніка, інформатика, управління*. 2024. № 2. С. 106–116. DOI: 10.15588/1607-3274-2024-2-11.
15. Буренко В. О., Чернов С. К. Синтез групових рішень для рішення задачі вибору транспортних засобів в процесі логістичного забезпечення міських пасажироперевезень. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. 2025. № 1 (10). С. 18–28. DOI: 10.20998/2413-3000.2025.10.3.

16. Рудень В. В., Гутор Т. Г. Методика проведення та оцінки результатів експертних оцінок. *Український медичний часопис*. 2011. № 2 (82)–III/IV. С. 31–34.
17. Гнатієнко Г. М., Снитюк В. Є. Експертні технології прийняття рішень. Київ : Маклаут, 2008. 444 с.
18. Данченко О. Б., Федотова Н. О. Огляд сучасних моделей і методів управління конфліктами у проєктах. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 60. С. 44–55. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.44-55.
19. Шерстюк О. І., Колесніков О. Є. Використання методу ранжирування при формуванні необхідного набору компетенцій команди проєкту. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проєктами*. 2018. № 2 (1278). С. 31–37. DOI: 10.20998/2413-3000.2018.1278.5.
20. Шпильовий І. Ф., Маруніч В. С., Вакарчук І. М., Харута В. С. Розробка моделі оцінки та методу відбору персоналу команди проєкту міських пасажирських перевезень. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проєктами*. 2016. № 2 (1174). С. 95–98. DOI: 10.20998/2413-3000.2016.1174.21.
21. Soltanifar M., Sharafi H., Lotfi F. H., Pedrycz W., Allahviranloo T. Preferential voting and applications: Approaches based on data envelopment analysis. Springer, 2023. 185 p.
22. Снитюк В. Є., Гнатієнко Г. М. Оптимізація процесу оцінювання в умовах невизначеності на основі структуризації предметної області та аксіоми незміщеності. *Штучний інтелект*. 2008. № 3. С. 217–223.
23. Shafer G. A. A mathematical theory of evidence. Princeton, NJ, United States: Princeton University, Dec. 1976. DOI:10.1515/9780691214696.
24. Liu Qia., Liu Qin., Wang M. Sustainable decision-making enhancement: trust and linguistic-enhanced conflict measurement in evidence theory. *Sustainability*. Mar. 2024. Vol. 16 (6):2288. DOI: 10.3390/su16062288.

25. Wang X., Qin J. Multimodal recommendation algorithm based on Dempster-Shafer evidence theory. *Multimedia Tools and Applications*. Sept. 2023. Vol. 83, Is. 10. P. 1–16. DOI:10.1007/s11042-023-15262-8.
26. Zhang Z., Xiao F. An information-volume-based distance measure for decision-making. *Chinese Journal of Aeronautics*. May 2023. Vol. 36, Is. 5. P. 392–405. DOI: 10.1016/j.cja.2022.11.007.
27. Топольницький М. В., Шишацький А. В. Метод комплексування об'єктивних та суб'єктивних даних на основі теорії свідчень Демпстера–Шейфера. *Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку* : матеріали XXI-ої Міжнародної наук.-практ. конф., Дебрецен, Угорщина, 07 червня 2022 р. С. 107–112.
28. Jousselme A.-L., Maupin P. Distances in evidence theory: Comprehensive survey and generalizations. *International Journal of Approximate Reasoning*. Feb. 2012. Vol. 53, Is. 2. P. 118–145.
29. Jie Z., Rui X., Zhenning D., Deyu T., Wenhong W. Evaluating the reliability of sources of evidence with a two-perspective approach in classification problems based on evidence theory. *Information Sciences*. 2020. Vol. 507. P. 313–338. DOI: 10.1016/j.ins.2019.08.033.
30. Han D. Q., Deng Y., Han C. Z., Yang Yi. Some notes on betting commitment distance in evidence theory. *Science China. Information Sciences*. 2012. Vol. 55. P. 558–565. DOI: 10.1007/s11432-011-4541-z.
31. Xiahou T., Zeng Z., Liu Yu, Huang H.-Z. Measuring conflicts of multisource imprecise information in multistate system reliability assessment. *IEEE Transactions on Reliability*. July 2021. Vol. 99. P. 1–18. DOI: 10.1109/TR.2021.3087531.
32. Zhu Jin., Luo Yu., Zhou Jia. Sensor reliability evaluation scheme for target classification using belief function theory. *Sensors*. 2013. Vol. 13. P. 17193–17221. DOI: 10.3390/s131217193.
33. Martin A., Jousselme A. L., Osswald C. Conflict measure for the discounting operation on belief functions. Proc. of the 11th Internat. Conf. on Information Fusion (*FUSION 2008*). Cologne, Germany, 30 June–3 July 2008. P. 1–8.

34. Буренко В. О. Групові експертні оцінки обробки інформації в комп'ютерних системах «розумного міста». *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 2 (89). С. 118–125. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2024.2.16.

35. Chumachenko I., Davidich N., Galkin A. Information support of simulation of vehicle flow distribution in urban projects of sustainable development. *In book: Intelligent information systems for decision support in project and program management* : Collective monograph; Ed.(s) by I. Linde. European University Press. Riga : ISMA, 2021. P. 25-41. URL: <https://www.isma.lv/zinatne/publikacijas/zinatniski-raksti-gramatas-monografijas/intelligent-information-systems-for-decision-support-in-project-and-program-management> (дата звернення: 21.10.2025).

36. Davidich N., Faletska H, Galkin A., Melenchuk T., Chumachenko I., Davidich Yu. Rationale of complex indicator of quality of public transport. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*. 2018. Vol. 7, Is. 1. P. 18–33. DOI: 10.2478/rjti-2018-0002.

37. Кононенко І. В., Сушко Г. В. Формування команди проєкту з розробки інформаційно-комунікаційних технологій. *Інформаційні Технології і Засоби Навчання*. 2019. Т. 73, № 5. С. 307–322. DOI: 10.33407/itlt.v73i5.2866.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПОВНЕНOSTІ ПАСАЖИРАМИ ЗУПИНОК МІСЬКОГО АВТОТРАНСПОРТУ

За допомогою програмного забезпечення (ПЗ) для автоматизації моніторингу та планування подачі міського транспорту шляхом обробки даних, отриманих з IP-камер можна на зручному візуальному інтерфейсі отримувати актуальну інформацію про наповненість зупинок міського транспорту, що дозволить своєчасно подавати транспорт на зупинки, покращити якість обслуговування громадян та оптимізувати рух міського пасажирського транспорту [1].

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- створити модуль (скрипт) для автоматичного аналізу зображень з IP-камер КС «розумного міста»;
- розробити базу даних (БД) для зберігання інформації щодо наповненості кожної зупинки на маршруті пасажирями [2];
- розробити інтерфейс користувача для роботи з даними та управління системою;
- оцінити працездатність та надійність розробленого ПЗ.

4.1 Розробка ПЗ перетворення зображення на гістограму яскравості

Зображення з IP-камер КС «розумного міста» може бути програмним шляхом перетворено у гістограму яскравості цього зображення [3].

Алгоритм роботи:

- 1) прийняти вхідний параметр, який є шляхом до зображення;
- 2) завантажити зображення за заданим шляхом;
- 3) використовуючи пакет *sharp*, перетворити зображення у напівтонове;
- 4) отримати масив значень яскравості пікселів зображення;

5) створити гістограму на основі отриманих значень яскравості використовуючи пакет D3.js;

6) зображення гістограми зберегти у файл.

Use Case діаграма розробленої комп'ютерної програми «BRIGHTNESS_HISTOGRAM» [4] наведена на рис. 4.1. Згідно зі сценарієм, за яким користувач взаємодіє із проєктованим застосунком, виконуючи будь-яку дію, що дозволена функціоналом застосунку, користувач спочатку встановлює застосунок, запускає його та вказує шлях до зображення. Програма генерує гістограму яскравості зображення.

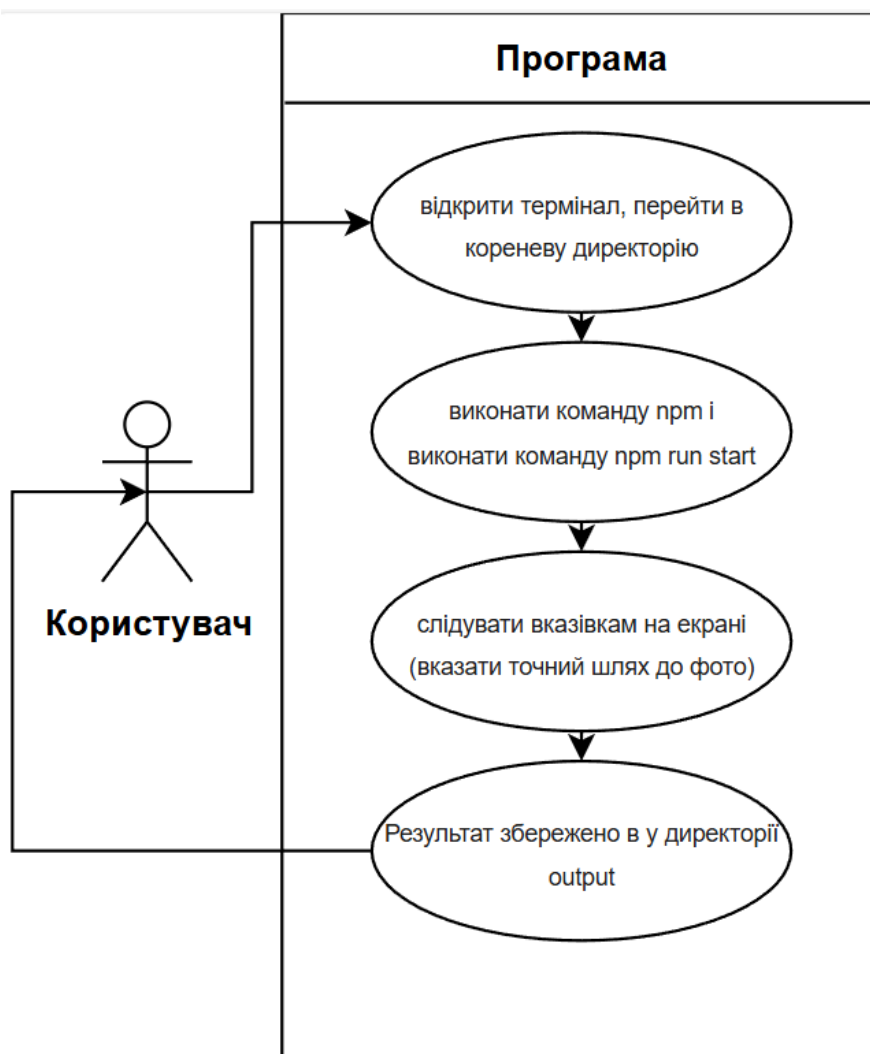


Рисунок 4.1 – Use Case Diagram програми «BRIGHTNESS_HISTOGRAM» (“BRI_HIST”)

Activity Diagram (UML-діаграма діяльності) програми “BRI_HIST” наведена на рис. 4.2. Наведене на рис. 4.2 візуальне представлення графу діяльності є різновидом графу станів скінченного автомату, вершинами якого є певні дії, а переходи відбуваються по завершенню дій.



Рисунок 4.2 – Діаграма діяльності програми “BRI_HIST”

На рис. 4.3 наведена **Component diagram** (UML-діаграма компонентів), на якій відображено компоненти, залежності та зв'язки між ними. Застосунок складається з двох модулів – **get-brightness.js** та **index.js**.

Перший модуль містить в собі всю основну логіку застосунку, а саме: приймає зображення, обробляє його за допомогою бібліотеки **sharp**, генерує гістограму яскравості за допомогою бібліотеки **d3-node** та зберігає її у форматі **png**.

Другий модуль слугує коренем застосунку, він імпортує в себе перший модуль. Спочатку, за допомогою бібліотеки **readline** зчитується з консолі шлях до зображення, з якого необхідно отримати гістограму. Після цього, запускаємо функцію **get-brightness** (перший модуль), в який в якості аргументу передається шлях до файлу.

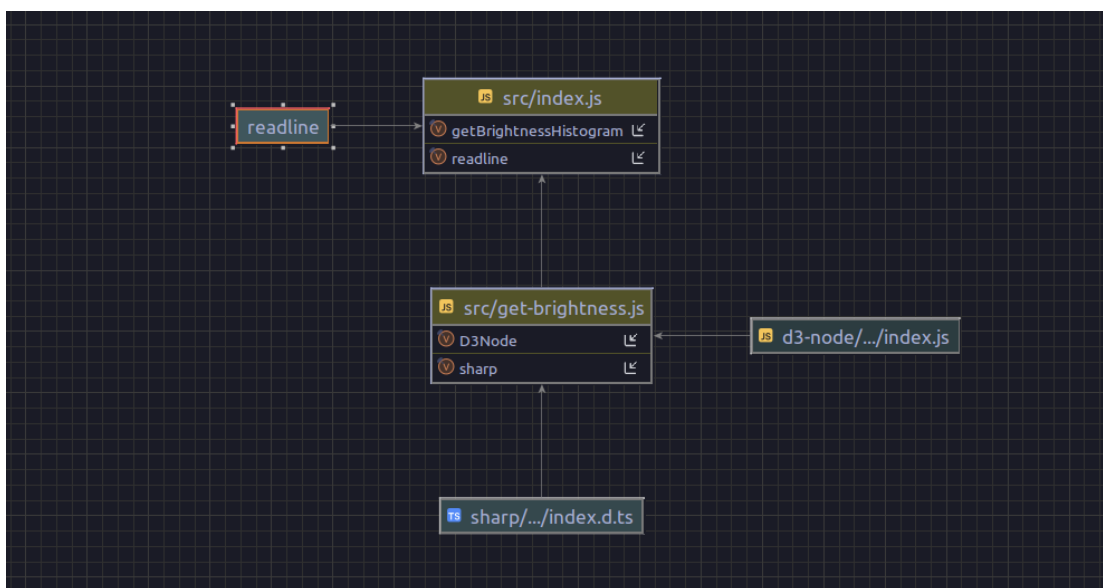


Рисунок 4.3 – Діаграма компонентів програми “BRI_HIST”

Для роботи із розробленим у середовищі розробки Webstorm [5] програмним застосунком потрібно встановити кросплатформне середовище Node.js 18.18.2 LTS для виконання JavaScript з відкритим вихідним кодом [6] та менеджер пакетів JavaScript – Node Package Manager (npm), – що керує залежностями в проєктах, написаних на Node.js, та дозволяє завантажувати пакети у застосунок з хмарного сервера npm [7; 8].

Для запуску програми потрібно виконати наступні команди:

- 1) використовуючи термінал, перейти в кореневу директорію застосунку;
- 2) виконати команду **npm i** (для встановлення залежностей);
- 3) виконати команду **npm run start**;

4) слідувати вказівкам на екрані.

Якщо програма запускається під управлінням ОС Linux, послідовність дій наведена на рис. 4.4, а. При цьому рядки 89–90 в модулі **get-brightness.js** (додаток Е.1) мають виглядати як:

```
89    .ToFile(`./output/${filePath.split('/').pop().split('.')[0]}-histogram.png`,
90 (err) => {
```

У наведених вище рядках коду слід звернути увагу про нахил похилої (скісної) риски – в командах ОС Linux використовується «пряма скісна риска» (від англ. *slash*).

Якщо програма запускається під управлінням під ОС Windows, послідовність дій наведена на рис. 4.4, б. При цьому рядки 89–90 в модулі **get-brightness.js** (див. додаток Е.1) мають виглядати як:

```
89    .ToFile(.\\output\\${filePath.split('\\').pop().split('.')[0]}-histogram.png,
90 (err) => {
```

У наведених рядках коду слід звернути увагу про нахил похилої (скісної) риски – в командах ОС Windows використовується «обернена скісна риска» (від англ. *backslash*);

5) після успішного виконання програми результат буде збережений в корені застосунку у директорії **output**.

Повна Інструкція користувача ПЗ перетворення зображення на гістограму яскравості наведена у Свідоцтві про реєстрацію авторського права на твір – Комп'ютерну програму «BRIGHTNESS_HISTOGRAM» [4].

```

anton@sowell: ~
anton@sowell:~$ cd MainStorage/dev/brightness-histogram/ && npm i && npm run start
up to date, audited 145 packages in 3s

10 packages are looking for funding
  run `npm fund` for details

9 high severity vulnerabilities

To address issues that do not require attention, run:
  npm audit fix

To address all issues (including breaking changes), run:
  npm audit fix --force

Run `npm audit` for details.

> brightness-histogram@1.0.0 start
> node src/index.js

Input the absolute path to the image: path/to/the/image.png

```

a)

```

D:\123-SmartSiity\123-SmartSiity>dir
Том в устройстве D имеет метку Новый том
Серийный номер тома: 0477-0A5E

Содержимое папки D:\123-SmartSiity\123-SmartSiity

28.07.2025  22:52  <DIR>      .
28.07.2025  22:52  <DIR>      ..
27.07.2025  20:20      20 175 .output${filePath.split('').pop().split('.')[0]}-histogram.png
27.07.2025  02:01  <DIR>      node_modules
27.07.2025  02:01  <DIR>      output
27.07.2025  20:15    118 873 package-lock.json
27.07.2025  01:28      372 package.json
27.07.2025  01:52    376 249 photo_2025-07-27_01-52-11.jpg
27.07.2025  20:15      2 874 756 photo_2025-07-27_01-52-11.png
27.07.2025  02:01  <DIR>      src
27.07.2025  01:28    103 697 User Guide .docx
        6 файлов      3 494 122 байт
        5 папок     152 234 262 528 байт свободно

D:\123-SmartSiity\123-SmartSiity>npm run start

> brightness-histogram@1.0.0 start
> node src/index.js

Input the absolute path to the image: D:\123-SmartSiity\123-SmartSiity\photo_2025-07-27_01-52-11.jpg
Histogram image saved

```

б)

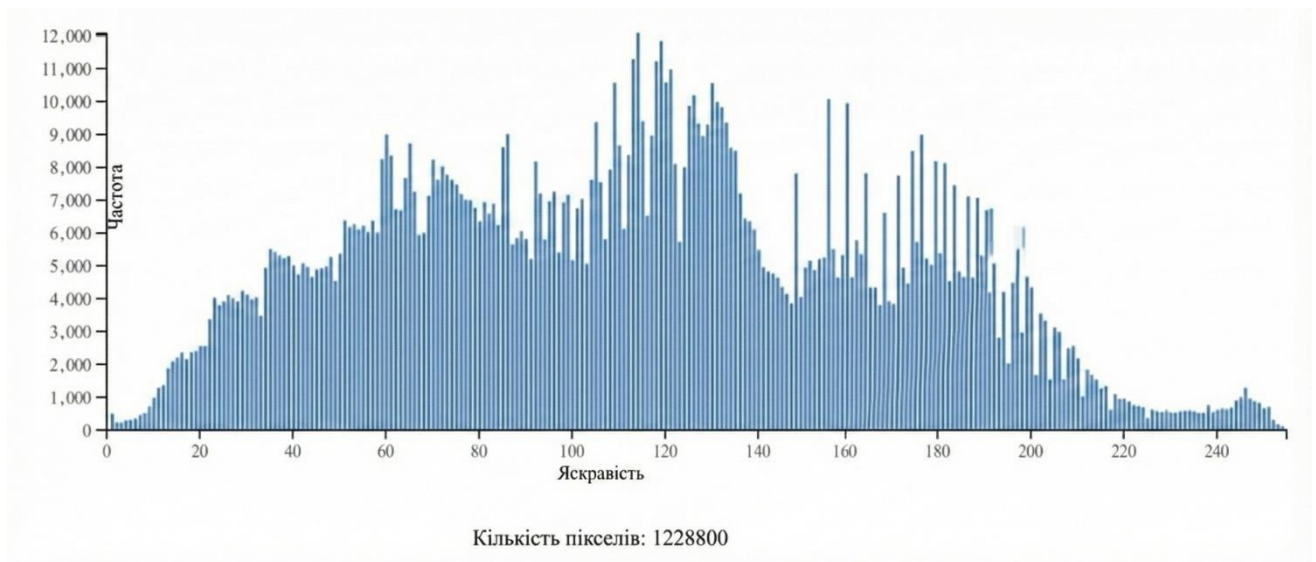
Рисунок 4.4 – Приклад запуску застосунку: а – під ОС Linux;
б – під ОС Windows

В результаті виконання програми із зображення (наприклад, наведеного на рис. 4.5, а) буде отримано графічне представлення гістограми яскравості зображення (рис. 4.5, б).

У якості характеристики наповненості зупинки пасажирами, що очікують міський транспорт, може бути використана характеристика *total Number of Pixels on brightness histogram* з гістограми яскравості (рис. 4.5, б), в яку має бути переведено відповідне зображення (рис. 4.5, а).



а)



б)

Рисунок 4.5 – Результат роботи програми перетворення зображення на гістограму яскравості: а – вхідне зображення; б – гістограма яскравості

На рис. 4.5, б вісь x представляє значення яскравості (від 0 до 255), а вісь y представляє кількість пікселів у зображенні, які мають це значення яскравості.

Характеристика *Total Number of Pixels* на зображенні, наведена під віссю *x*, може бути використана як характеристика наповненості зупинки пасажирями, що очікують міський транспорт [1].

4.2 Розробка ІС для накопичення інформації з ІР-камер ІВМ КС «розумне місто»

Інформаційну систему (ІС) для накопичення інформації з ІР-камер ІВМ КС «розумне місто» можна реалізувати у вигляді вебзастосунку, що складається з двох компонентів та бази даних (БД) для накопичення інформації з ІР-камер ІВМ КС «розумного міста».

Перший компонент відповідає за відображення даних про камери спостереження, у той час як другий – за відображення картографічних даних та інформації про камери на мапі. На рис. 4.6 наведено узагальнену структуру взаємодії компонентів такої ІС.

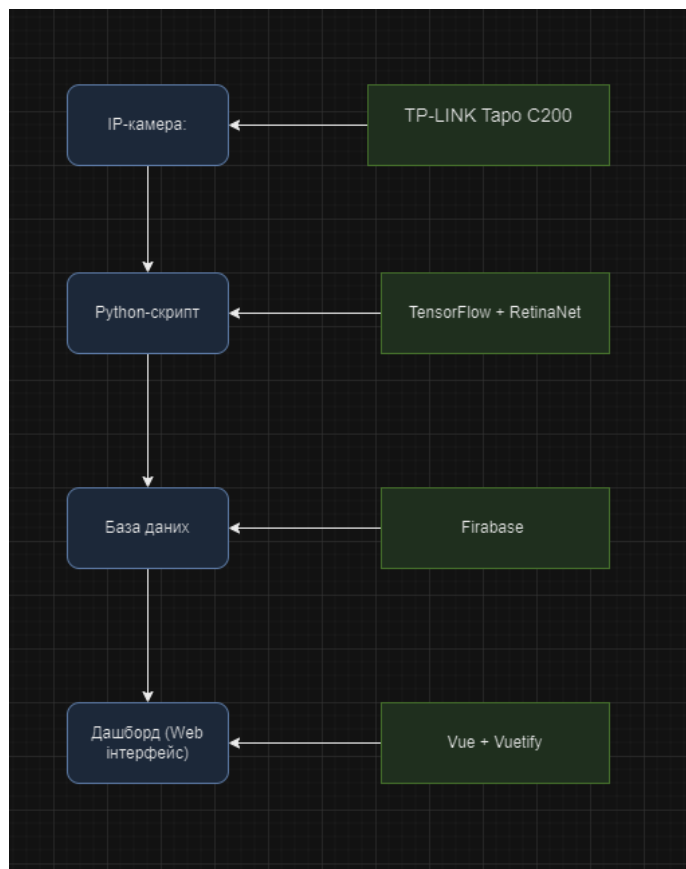


Рисунок 4.6 – Узагальнена структура взаємодії компонентів ІС

Відповідно до наведеної на рис. 4.6 структури, розроблюване ПЗ базується на взаємодії наступних елементів:

- IP-камера: джерело відеоданих, налаштоване на трансляцію потокового відео в реальному часі;
- Python-скрипт (обчислювальний модуль): програмне забезпечення на Python, інтегроване з бібліотекою машинного навчання TensorFlow. Як детектор об'єктів застосовано модель RetinaNet. Аналізує кадр кожні 15 с і записує результати аналізу до БД;
- База даних: нереляційна БД Firebase, що забезпечує збереження результатів моніторингу та їх синхронізацію з кадрами, аналіз яких виконано обчислювальним модулем;
- Дашборд (користувацький інтерфейс): Вебзастосунок для візуалізації статистики, побудований на технологічному стеку Vue.js у поєднанні з UI-бібліотекою Vuetify;

Процес акумуляції відеоданих із засобів відеоспостереження та супровідних метаданих зображень реалізовано на рівні БД, технічні специфікації якої продемонстровано на рис. 4.7, а.

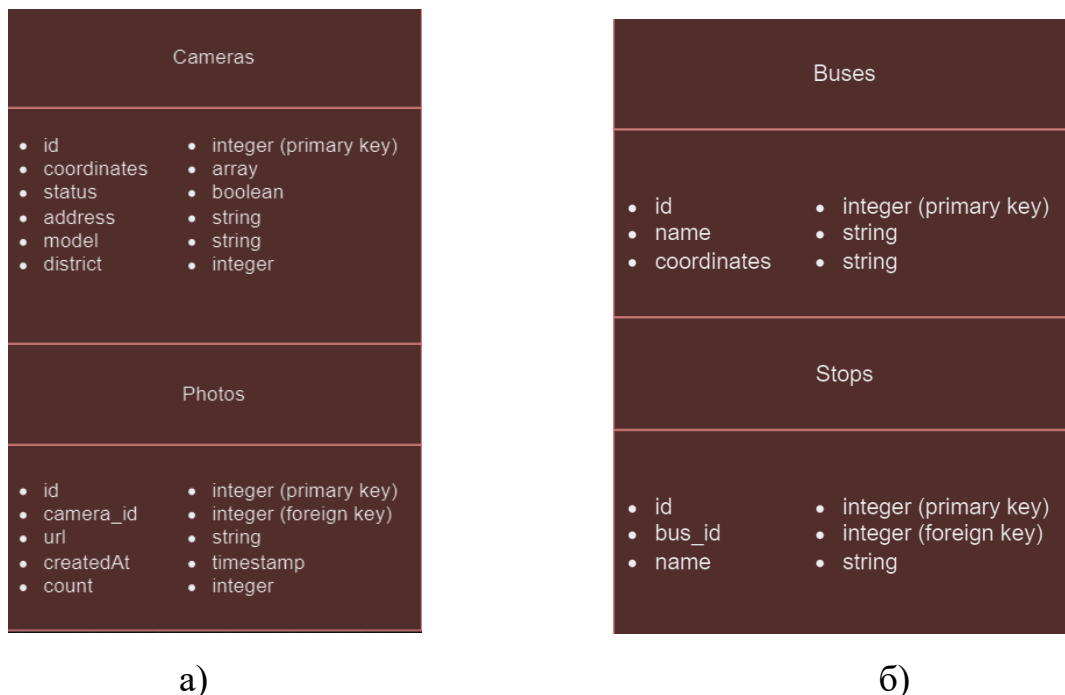


Рисунок 4.7 – Структура БД: з об'єктами «Cameras» та «Photos» (а), з об'єктами «Buses» та «Stops» (б)

Структура бази даних передбачає розподіл інформації за логічними сутностями. Сутність «**Cameras**» агрегує параметри IP-камер. Ключовим атрибутом виступає унікальний ідентифікатор (*id*). Геопросторова прив'язка пристрою задається через поле *coordinates* (широта та довгота), а його фізична поштова адреса та приналежність до адміністративної одиниці фіксуються в полях *address* та *district* відповідно. Технічні аспекти описуються моделлю камери (*model*), а поточний робочий стан визначається булевим прапорцем *status* (активна *true* / неактивна – *false*).

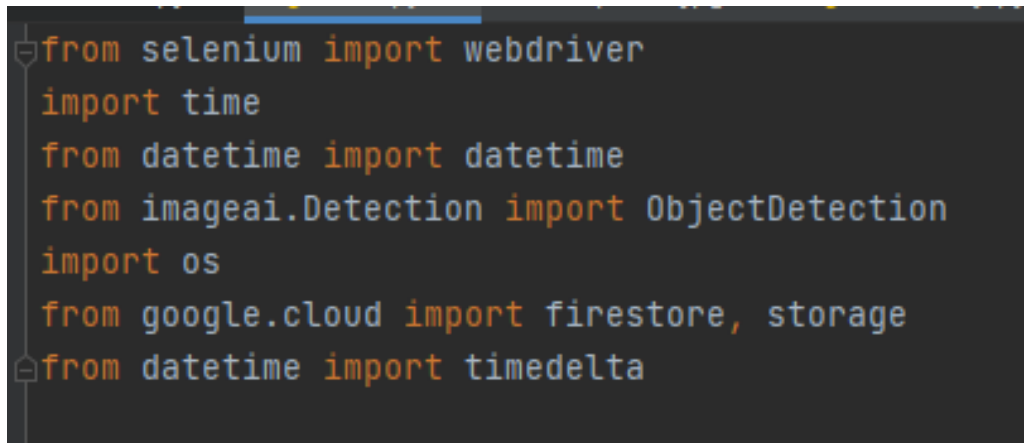
Для збереження графічних даних призначено колекцію «**Photos**». Кожен запис містить власний ідентифікатор кадру з IP-камери (*id*) та посилання на батьківський об'єкт – камеру (*camera_id*), що реалізує зв'язок «один-до-багатьох». Безпосередній доступ до зображення забезпечується через атрибут *url*. Часові мітки генерації контенту зберігаються у полі *createdAt*, а метрики популярності кадру – у полі *count*.

Опис БД маршрутів «**Buses**» та зупинок «**Stops**» наведено на рис. 4.7, б.

Маршрутна мережа моделюється об'єктом «**Buses**», який, окрім первинного ключа (*id*), містить атрибут *name* (номер або назва рейсу). Траєкторія руху записана у форматі рядка координат *coordinates* (широта та довгота).

Взаємозв'язок із зупинками реалізовано через сутність «**Stops**». Вона включає унікальний для кожної зупинки ідентифікатор (*id*), назву зупинки (*name*) та зовнішній ключ *bus_id* (ціле значення), що забезпечує реляційну цілісність даних, прив'язуючи зупинку до конкретного маршруту.

На етапі ініціалізації програми виконується підключення залежностей, необхідних для коректної роботи системи. Програмне середовище інтегрує низку системних та зовнішніх бібліотек, серед яких: *os*, *time*, *datetime*, а також спеціалізовані інструменти *selenium*, *ObjectDetection*, *firebase* та *storage*. Зазначений набір компонентів (рис. 4.8) формує функціональний базис для автоматизованого керування браузером, темпоральної синхронізації процесів, комп'ютерного зору та комунікації з хмарною інфраструктурою Google Cloud.



```

from selenium import webdriver
import time
from datetime import datetime
from imageai.Detection import ObjectDetection
import os
from google.cloud import firestore, storage
from datetime import timedelta

```

Рисунок 4.8 – Імпорт бібліотек

Специфіку роботи програми відображення даних про IP-камери відеоспостереження забезпечують такі модулі:

- для реалізації функцій вебскрапінгу застосовано бібліотеку **Selenium**. Цей інструментарій дозволяє емулювати сесію користувача, забезпечуючи програмне відкриття цільових URL-адрес, маніпуляції з елементами DOM-дерева сторінки та екстракцію необхідних даних;

- задачу комп'ютерного зору вирішує клас **ObjectDetection**, що входить до складу пакету **ImageAI**. У розробленому скрипті він сконфігурований для детекції класу об'єктів «людина» на вхідних графічних файлах;

- інтеграція з хмарною екосистемою Google реалізована через клієнтські бібліотеки **Firestore** та **Storage**. Перша забезпечує транзакції запису структурованих даних до NoSQL-бази, а друга відповідає за збереження бінарних файлів (зображень) у хмарному репозиторії.

Ініціалізація роботи скрипту передбачає визначення конфігураційних констант. До них належать: локальний шлях до файлу авторизації сервісного акаунту (Service Account Key), назва цільової колекції у БД Firestore, а також робоча директорія проєкту та адреса виконуваного файлу вебдрайвера Chrome (рис. 4.9).

```

os.environ["GOOGLE_APPLICATION_CREDENTIALS"] = "key.json"

collection_name = 'cameras'
storage_client = storage.Client()
db = firestore.Client()

exec_path = os.getcwd()

driver_path = 'path/to/chromedriver.exe'

```

Рисунок 4.9 – Налаштування доступу до служб Google Cloud, Firestore та Cloud Storage

Етап налаштування браузера включає створення екземпляра класу **ChromeOptions**. Це дозволяє задати специфічні прапори запуску, зокрема вимкнення автоматичних оновлень під час завантаження та ігнорування попереджень про ненадійні SSL-сертифікати. Запуск сесії здійснюється через об'єкт **ChromeService**, у який передаються параметри драйвера Chrome.

Архітектура Python-скрипту передбачає використання двох спеціалізованих методів для комунікації з хмарною інфраструктурою. Метод **upload_image_to_storage** відповідає за перенесення інформації про завантажені зображення, тоді як **update_document_with_image** забезпечує синхронізацію записів у базі Firestore, додаючи актуальні метадані про нові зображення.

Процедура експорту даних до сховища (Firebase Storage) реалізується за чітким алгоритмом у функції **upload_image_to_storage**. На першому кроці відбувається ідентифікація цільового контейнера (**bucket**) для зберігання файлів. Далі програма виконує парсинг вхідного шляху для виокремлення назви файлу. Потім із шляху до файлу вилучається його назва. Ключовим етапом є створення та завантаження сутності **Blob**, що представляє бінарні дані зображення. Після успішного переміщення файлу у хмару система генерує унікальне посилання (**Signed_URL**) для віддаленого доступу. Термін валідності цього токена встановлюється на період у 365 днів. Отримана вебадреса є вихідним результатом роботи функції і передається для подальшої обробки.

Алгоритм синхронізації метаданих реалізовано у методі ***update_document_with_image***. Його завдання полягає у модифікації записів колекції Firestore шляхом інтеграції відомостей про нові зображення. Процес розпочинається з отримання посилання на цільовий документ, використовуючи його унікальний ідентифікатор. Далі формується структурований об'єкт даних, що містить ключові метрики: ID зображення, пряме посилання (URL), інтегральний індекс наповненості зупинки (кількість виявлених осіб) та часову мітку створення. На фінальному етапі скрипт зчитує поточний стан масиву ***Photos***, додає до нього новостворений об'єкт та виконує транзакцію оновлення документа в БД.

Автоматизований робочий процес забезпечується головним циклом виконання програми. Логіка роботи передбачає послідовну ініціалізацію вебсесії, захоплення графічного вмісту екрана (створення скріншотів) та їх подальшу обробку для пошуку об'єктів (у даному випадку – людей). Після завершення аналізу система ініціює процедуру експорту даних: графічні файли передаються у хмарне сховище, а результати детекції фіксуються у базі Firestore. Завершення роботи скрипта супроводжується коректним закриттям процесу браузера, що дозволяє вивільнити системні ресурси та збільшити час енергонезалежності пристрою, на якому оброблювалася та переглядалася інформація.

Узагальнюючи вищевикладене, можна зробити висновок, що розроблена комп'ютерна програма [9] забезпечує повний цикл автоматизації моніторингу: від детекції об'єктів на відеопотоці до хмарної архівації результатів. Інтеграція спеціалізованих Python-бібліотек, зокрема *Selenium* для веб-навігації, *ImageAI* для комп'ютерного зору та клієнтських модулів Google Cloud, дозволила створити ефективну систему збору та актуалізації даних у реальному часі.

4.3 Розробка користувацького інтерфейсу для роботи з даними IBM КС «розумне місто»

Інтеграція клієнтського вебзастосунку з БД Firebase вимагає налаштування параметрів доступу. Необхідні конфігураційні дані (API-ключі, ідентифікатори

проєкту тощо) експортуються з консолі розробника та імплементуються у програмний код. Реалізація логіки обміну даними на стороні користувача виконана мовою JavaScript. Процедура ініціалізації з'єднання завершується етапом валідації: для підтвердження успішної комунікації з сервером у системний журнал (консоль) виводиться діагностичне повідомлення, як показано на рис. 4.10.

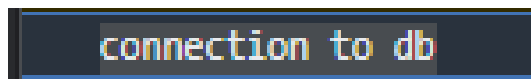
```
import firebase from 'firebase/app';
import 'firebase/firestore';

const firebaseConfig = {
  apiKey: "AIzaSyAIkSQwZw0InDvZLHb-fVYRYViZw-wUhLs",
  authDomain: "smartcity-a7289.firebaseio.com",
  databaseURL: "https://smartcity-a7289-default-rtdb.firebaseio.com",
  projectId: "smartcity-a7289",
  storageBucket: "smartcity-a7289.appspot.com",
  messagingSenderId: "390577141787",
  appId: "1:390577141787:web:148223d217fcfd3da8e0be"
};

if (!firebase.apps.length) {
  firebase.initializeApp(firebaseConfig);
}

export default firebase;
```

а)



```
connection to db
```

б)

Рисунок 4.10 – Налаштування інтеграції з Firebase: а – скрипт ініціалізації;

б – результат тестування підключення

За результатами розробки та функціонального тестування компонентів клієнтської частини (Vue.js) було встановлено наступне:

- **Графічний інтерфейс:** Візуалізацію успішно реалізовано на базі бібліотеки *Vuetify* (рядок 3 JavaScript-коду дашборду в додатку Е.2). Використання сіткової структури (*v-row*, *v-col*) та контейнерів (*v-card*) дозволило створити ергономічне відображення переліку камер для користувача;

- **Пошукова система:** Механізм фільтрації, імплементований через компонент *v-text-field*, що забезпечує коректну обробку масиву параметрів IP-камер, дозволяючи миттєво знаходити потрібні записи;
- **Аналітична візуалізація:** Графіки типів *PieChart* та *DoughnutChart* наочно демонструють статистичний розподіл за статусами пристроїв та районами міста. Кольорова індикація (бейджі) діаграм повністю узгоджена із загальною стилістикою інтерфейсу;
- **Інтерактивні елементи:** Компонент *CameraModel* реалізує функціонал модальних вікон. При виборі моделі камери користувачеві надається розширена технічна інформація, що покращує юзабіліті системи;
- **Табличні дані:** Компонент *v-data-table* безпомилково рендерить інформацію про камери та їх поточний стан. Конфігурація заголовків таблиці (*headers*) чітко відповідає структурі вхідних даних;
- **Логіка керування:** Програмні методи *openModal* та *closeModal* забезпечують коректний життєвий цикл модальних вікон, відповідаючи за їх своєчасну активацію та приховування;
- **Обробка даних:** Структура масиву об'єктів *cameras* пройшла валідацію та повністю адаптована для відображення у табличному вигляді, що підтверджує коректність передачі інформації;
- **Якість коду:** Організація скриптів та стилів (секція *style*) відповідає стандартам розробки на Vue.js та Vuetify, гарантуючи читабельність коду та простоту його подальшої підтримки;
- **Надійність:** Тестування підтвердило стабільність роботи компонента: система стійка до помилок та коректно реагує на дії користувача у різних сценаріях використання.

Результат програмної реалізації графічного інтерфейсу, що відображає основні елементи керування та моніторингу, продемонстровано на рис. 4.11.

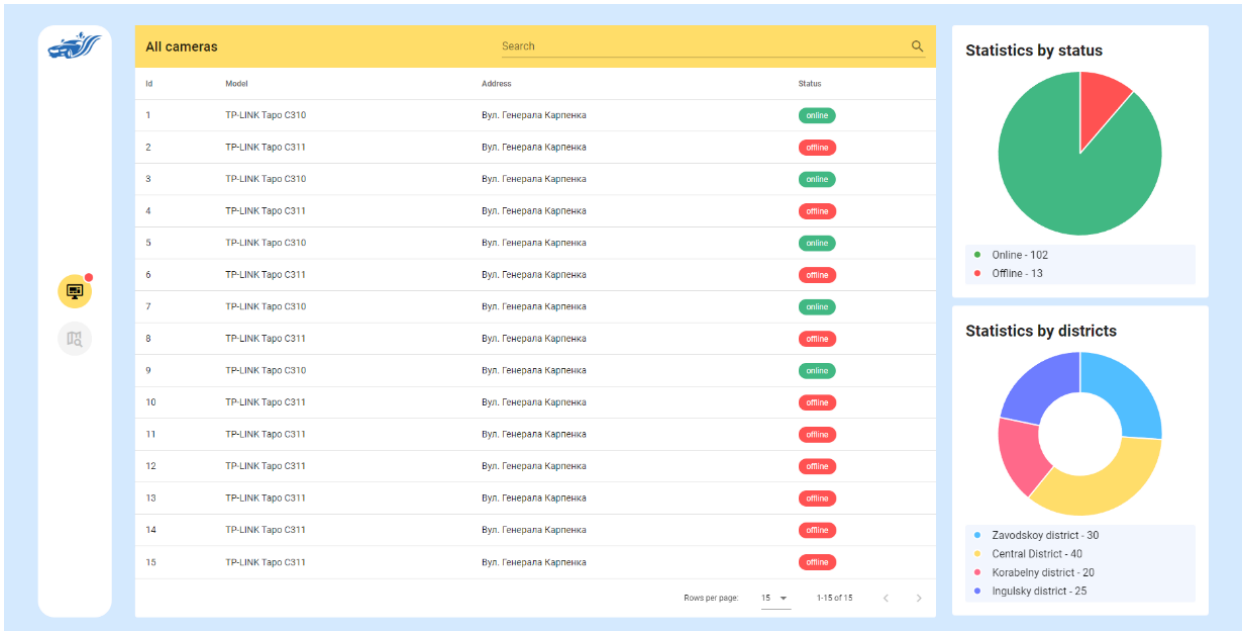


Рисунок 4.11 – Загальний вигляд головної сторінки інформаційної панелі

Функціонал системи передбачає візуалізацію статистики наповненості зупинок пасажирами. При виборі конкретного об'єкта відкривається модальне вікно з інтегрованою стовпчиковою діаграмою. Цей елемент інтерфейсу демонструє динаміку максимальної кількості людей у кадрі для кожного часового інтервалу (наприклад, с 06:00 по 07:00 максимум був 48 %), що дозволяє оцінити інтенсивність трафіку протягом доби, як показано на рис. 4.12.

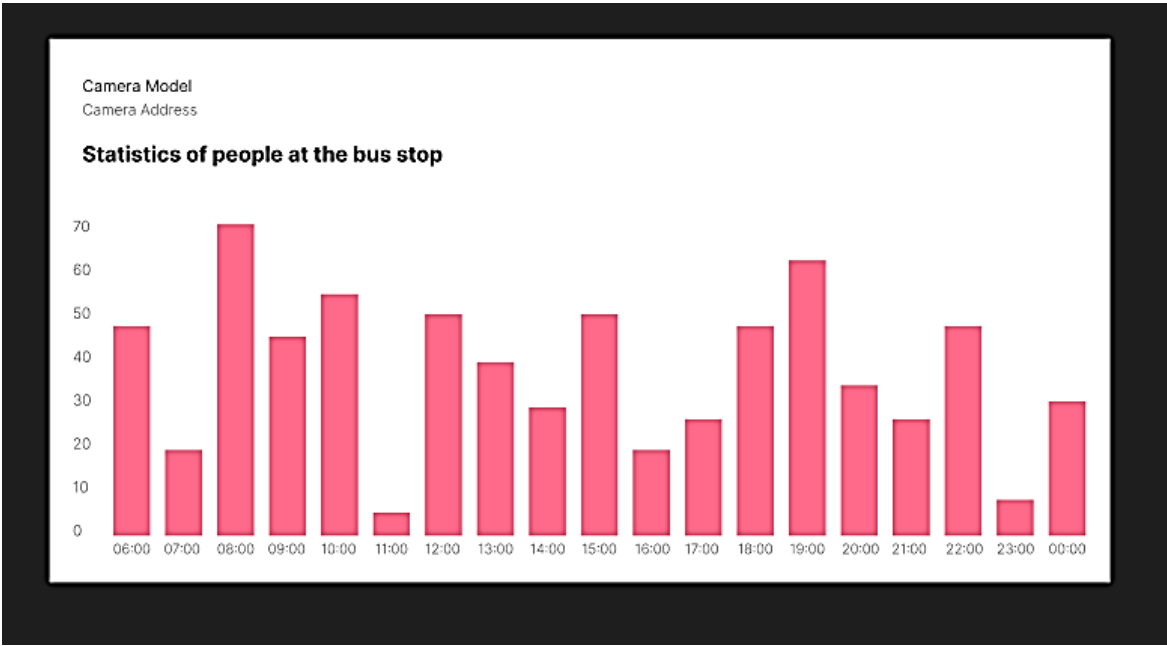


Рисунок 4.12 – Інтерфейс модального вікна з погодинною статистикою наповненості зупинки

Для просторової орієнтації в системі передбачено окрему вкладку з інтегрованою мапою. Програмний компонент дозволяє користувачеві змінювати масштаб відображення, наближаючи або віддаляючи необхідні ділянки. Розміщення камер відеофіксації позначено спеціальними піктограмами, координати яких синхронізовані з БД. Візуальне представлення цього інтерфейсу наведено на рис. 4.13.



Рисунок 4.13 – Візуалізація мережі відеоспостереження на інтерактивній мапі

Інтерактивність картографічного модуля уніфіковано з іншими частинами системи: при виборі конкретного маркера камери ініціюється виклик модального вікна з аналітичними даними, описаного в попередніх підрозділах. Наступним етапом модернізації стало впровадження візуалізації транспортної мережі. Для цього базу даних було наповнено геопросторовими координатами маршрутів № 16 та № 56. Зміни торкнулися і компонування інтерфейсу: праворуч від області мапи інтегровано інтерактивний список доступних рейсів для швидкої навігації, як продемонстровано на рис. 4.14.

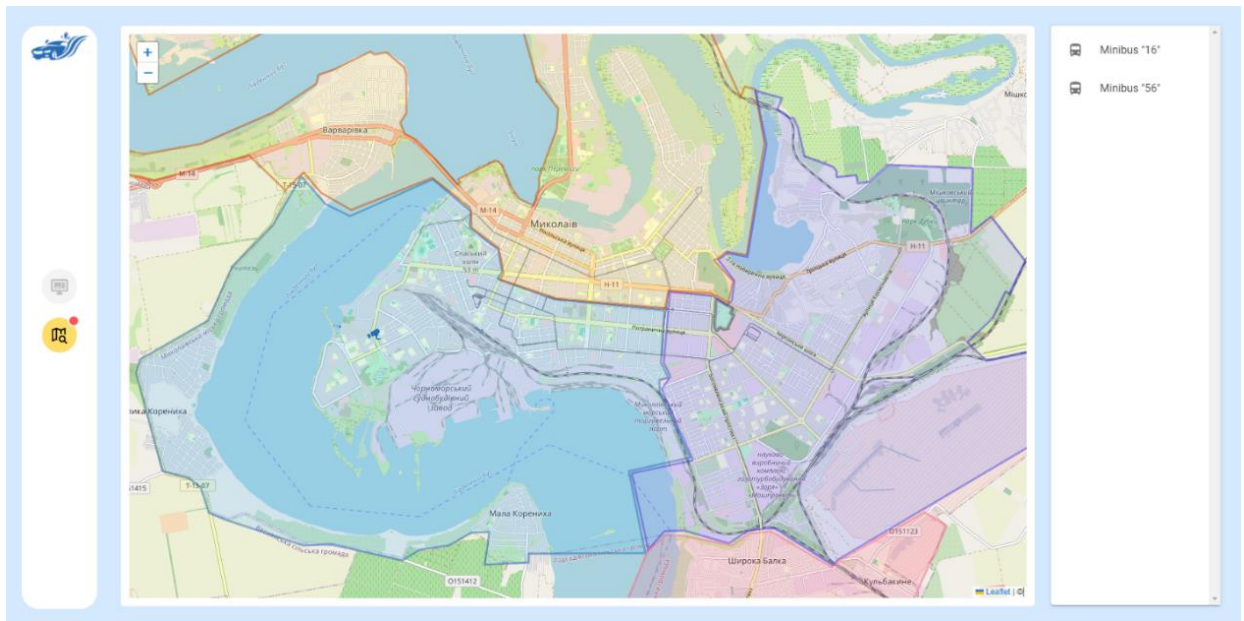


Рисунок 4.14 – Оновлений інтерфейс картографічного модуля
з панеллю маршрутів

Користувач обирає необхідний маршрут у боковому меню. У відповідь вебзастосунок підсвічує траєкторію руху на мапі зеленим кольором та виводить повний перелік зупинок у правій панелі, забезпечуючи зручну навігацію, як показано на рис. 4.15.

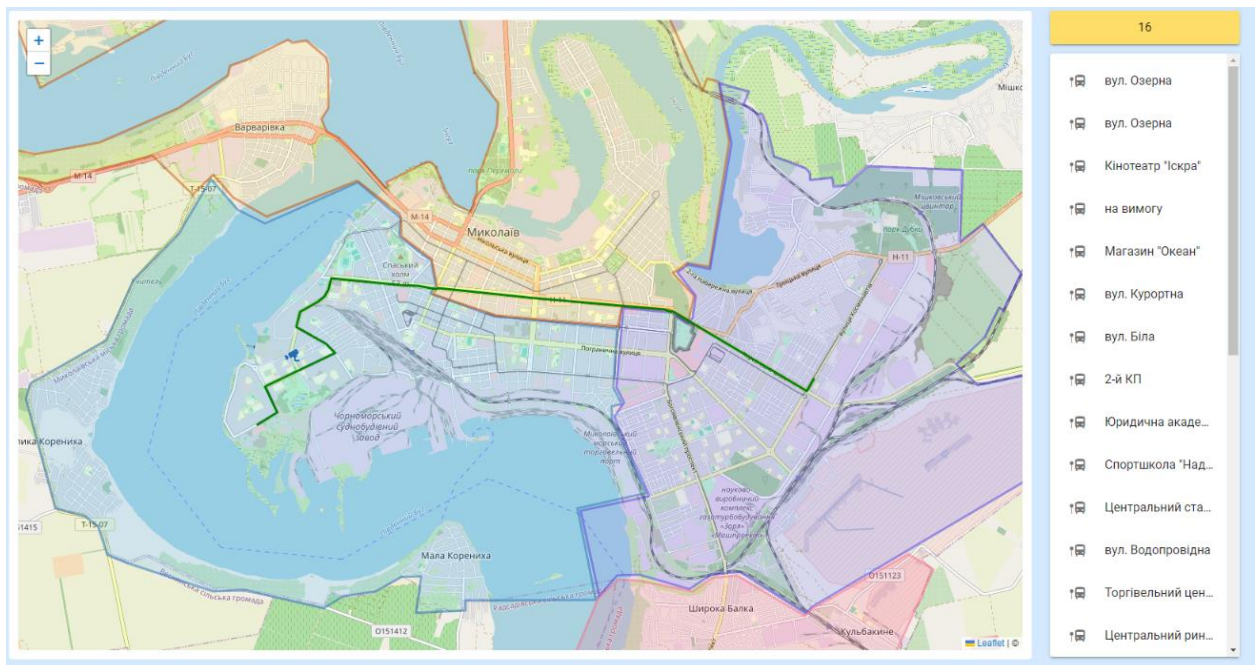


Рисунок 4.15 – Візуалізація траєкторії маршруту № 16 та переліку зупинок
на мапі міста

Реалізація навігаційної логіки передбачає можливість швидкого повернення до головного меню. Ця дія ініціюється повторною взаємодією з активним елементом інтерфейсу – кнопкою з номером поточного маршруту (виділена жовтим кольором). Така організація UX дозволяє користувачеві інтуїтивно перемикатися між режимами перегляду.

Повна Інструкція користувача ПЗ оцінювання наповненості зупинок МПТ на підставі даних з ІВМ КС «розумне місто» наведена у Свідостві про реєстрацію авторського права на твір – Комп'ютерну програму «PASSENGER COUNTING VIA IP CAMS» [9].

Подальша модернізація ПЗ може включати інтеграцію технологій моніторингу в реальному часі. Оснащення рухомого складу модулями GPS-навігації дозволить генерувати безперервний потік геопросторових даних. Архітектура системи дозволяє приймати ці координати на серверній стороні та, використовуючи можливості JavaScript (наприклад, через технологію WebSocket), динамічно оновлювати позиції маркерів транспорту на електронній карті без необхідності перезавантаження сторінки.

Підсумовуючи викладене, можна стверджувати, що розроблені програмні модулі повною мірою вирішують поставлені завдання. Система забезпечує автоматизований моніторинг пасажиропотоку за допомогою комп'ютерного зору та аналізу відеоданих з мережі IP-камер КС «розумне місто» [4]. Реалізований вебінтерфейс надає операторам зручний інструментарій для оцінки завантаженості зупинки МПТ [9] та подальшого керування процесами регулювання пасажиропотоку.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі розроблені програмні засоби реалізації математичних моделей та методів інформаційно-комп'ютерної технології, розглянутих у попередніх розділах. Програмне забезпечення призначене для багатокритеріального моніторингу пасажиропотоку у режимі реального часу. Основна функція розробленого рішення полягає в автоматизованому визначенні

рівня завантаженості зупинок громадського транспорту. Це досягається шляхом застосування алгоритмів комп'ютерного зору для обробки відеопотоку, що надходить від IP-камер IBM KC «розумне місто» з метою подальшої оптимізації диспетчерського керування та своєчасною подачею ТЗ на маршрут для розвантаження зупинки від натовпу пасажирів.

Архітектура створеного програмного забезпечення базується на трьох взаємопов'язаних компонентах. Першим є обчислювальний модуль (скрипт), який відповідає за автоматичну детекцію об'єктів на зображеннях. Другий елемент – це база даних, що слугує сховищем статистичної інформації про кількість пасажирів на кожній зупинці визначеного маршруту. Третьою складовою виступає клієнтський вебінтерфейс, який надає інструменти для візуалізації даних та адміністративного керування системою.

Серія проведених випробувань підтвердила надійність роботи алгоритмів у різних умовах експлуатації: система демонструє високу точність як на стандартних знімках в умовах якісного освітлення, так і в режимі нічної зйомки. Реалізовано механізм хмарного резервування даних, отриманих з IP-камер, з їх подальшою трансляцією до диспетчерського центру. Це забезпечує можливість оперативного планування перевезень на основі інтерактивної карти з актуальними маршрутами та зупинками. Вся аналітична інформація зберігається в БД для подальшого відображення на інформаційній панелі (Dashboard).

Використання результатів дослідження дозволить покращити якість обслуговування громадян та оптимізувати рух міського пасажирського транспорту.

Основні результати розділу опубліковані в роботі [1; 4; 9].

Список використаних джерел до розділу 4

1. Буренко В. О. Аналіз наповненості зупинок пасажирського транспорту за допомогою алгоритмів обробки зображень з IP-камер «розумного міста». *Вісник Хмельн. нац. ун-ту. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 1, № 5. С. 47–52. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-325-5

2. Шувалова О. І. Висвітлення сутності бази даних як основної складової WEB-орієнтованої інформаційної системи. *Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова. Серія 2. Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання*. 2020. № 22(29). С. 145–152. DOI: 10.31392/NPU-nc.series2.2020.22(29).20.

3. Pradeep, Namratha M., Manu G. V. Global and localized histogram equalization of an image. *International Journal of Computational Engineering Research*. Oct. 2012. Vol. 2, Is. 6. P. 238–252. URL: <https://www.ijceronline.com/papers/print-paper/2-6.pdf> (Last accessed: 21.10.2025).

4. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 139134. Комп'ютерна програма «BRIGHTNESS_HISTOGRAM» : комп'ютерна програма / В. О. Буренко, В. А. Гусєва-Божаткіна ; дата реєстр. 28.08.2025, Бюл. № 93. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1878768/> (дата звернення: 21.10.2025).

5. Raj P. J. A quantitative and qualitative analysis of popular integrated development environments for frontend development. *Journal of Engineering and Applied Sciences Technology*. 2025. Vol. 7, Is. 6. P. 1–6. DOI: 10.47363/JEAST/2025(7)323.

6. Node.js® is an open-source, cross-platform JavaScript runtime environment. URL: <https://nodejs.org/en> (Last accessed: 21.10.2025).

7. NPM: Public collection of packages of open-source code for Node.js. URL: <https://www.npmjs.com/> (Last accessed: 21.10.2025).

8. NPM Docs: Downloading and installing Node.js and npm. URL: <https://docs.npmjs.com/downloading-and-installing-node-js-and-npm#using-a-node-version-manager-to-install-nodejs-and-npm> (Last accessed: 21.10.2025).

9. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 139638. Комп'ютерна програма «PASSENGER COUNTING VIA IP CAMS» : комп'ютерна програма / В. О. Буренко ; дата реєстр. 23.09.2025, Бюл. № 94. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1883726/> (дата звернення: 21.10.2025).

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота на тему «Математичні моделі для обробки інформації в комп'ютерних системах енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж» присвячена розробленню математичних моделей, які забезпечують виділення ознак образів, методів аналізу отриманої інформації та прийняття рішення для оптимізації функціонування підсистеми міських пасажироперевезень як складової комп'ютерної системи (КС) «розумного міста» (Smart City) з використанням зображень з обладнання інформаційно-вимірювальної мережі КС Smart City.

У ході дослідження було вирішено низку актуальних завдань з дослідження сучасних інформаційних технологій, що використовуються для виявлення та обліку людей у міському просторі, у т. ч. шляхом аналізу зображень з IP-камер, які є хостами інформаційно-вимірювальної мережі (ІВМ) «розумного міста»; розроблення математичних моделей та програмного забезпечення для визначення наповненості зупинок пасажирями з використанням методів бінарізації зображень та RGB-діаграм яскравості; розроблення математичних моделей оптимізованого енергоспоживання IoT-пристроями зі збільшенням часу енергонезалежності для роботи у локальних диспетчерських пунктах перевізників; розроблення моделі прийняття групових рішень щодо розподілу пасажирського транспорту в умовах багатокритеріальності та складних форм невизначеності при логістичному забезпечення мультимодальних пасажирських перевезень.

За результатами проведених досліджень розроблено наступні математичні моделі:

1) математична модель наповненості зупинок міського автотранспорту на основі аналізу кадрів з IP-камер системи «розумне місто», що дозволяє визначити індекс наповненості окремого кадру з відеопотоку та зменшити обчислювальну складність прийнятого рішення;

2) математична модель управління невизначеностями у системі підтримки прийняття рішень для організації бізнес-процесу пасажирських перевезень міським автотранспортом шляхом подальшого розвитку методу групових

експертних оцінок з використанням метрик теорії свідочств, що дозволяє коректно працювати з експертними свідочтвами, сформованими в умовах багатокритеріальності та складних форм невизначеності;

3) математична модель оптимізованого енергоспоживання у локальних пунктах оброблення зображень експертами перевізників засобами IoT-пристроїв шляхом розподілу виконуваних процесором обчислень у розрізі ядер, що дозволяє зменшити коефіцієнт завантаженості процесора та збільшити час енергонезалежності хостів IBM;

4) спрощені одновимірні математичні моделі зменшеного порядку для об'єктів IBM КС «розумне місто», що дозволяє здійснювати оцінювання часу енергонезалежності сегменту IBM на зупинці пасажирського транспорту та автоматизоване переключення хоста IBM на інше джерело живлення.

Практичне значення полягає у розробленні інформаційно-комп'ютерної технології (ІКТ), яка поєднує:

- процес оброблення RGB-гістограм зображень з IP-камер КС «розумне місто» на основі запропонованого інтегрального індексу наповненості зупинок;
- багатofакторний аналіз вибору ТЗ для подачі на визначені зупинки;
- підтримку прийняття рішень підгрупами експертів на основі узгодженості оціночних суджень;
- візуалізацію актуальної інформації про наповненість зупинок міського транспорту на вебінтерфейсі, у єдиній архітектурі підсистеми міського пасажирського транспорту (МПТ).

Розроблена ІКТ, інтегрована у підсистему МПТ комп'ютерної системи «розумне місто», спрямована на синтез консолідованих експертних рішень щодо диспетчеризації пасажирських транспортних засобів у режимі реального часу, з урахуванням факторів невизначеності та нечіткості вхідної інформації, для підтримки прийняття рішень з організації бізнес-процесу пасажирських перевезень міським автотранспортом на основі аналізу рівня наповненості зупинок за даними з IP-камер.

Результати дослідження впроваджено у науково-дослідні роботи за підтримки Міносвіти і науки України (№ держ. реєстрації 0118U000193 та 0117U007144), у навчальний процес Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (ОПП «Комп'ютерні науки» та ОПП «Управління проєктами»), у виробничу діяльність комерційного та комунального підприємств, що засвідчено відповідними актами впровадження.

Таким чином, у дисертаційній роботі запропоновано та апробовано сучасні підходи до обробки зображень з IP-камер системи «розумне місто» та використання результатів їх аналізу у процесі експертного оцінювання та прийняття рішень для вирішення задачі оптимізації пасажирських перевезень міським автотранспортом.

Результати роботи суттєве практичне значення в галузі автоматизованих систем обробки та аналізу зображень, систем моніторингу у реальному часі бізнес-процесу організації міських пасажирських перевезень.

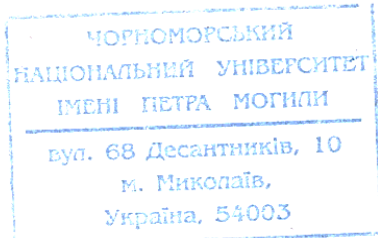
Попри певні складнощі застосування даних IP-відеоспостереження в системах інтелектуального транспортного середовища «розумного міста», їх обробка в режимі реального часу представляє перспективний напрямок досліджень. Використання таких технологій сприяє формуванню адаптивних, інтелектуальних та екологічно орієнтованих міських середовищ, що здатні значно підвищити якість повсякденного життя мешканців.

Запропоновані підходи можуть бути ефективно інтегровані у системи моніторингу натовпу, планування заходів безпеки в громадських просторах, управління корпоративними мережами, реалізацію концепцій «розумного міста» та платформ Інтернету речей (IoT), а також у науково-дослідну діяльність і навчальний процес підготовки спеціалістів за спеціальністю 122/F3 «Комп'ютерні науки».

ДОДАТОК А

Документи щодо впровадження та використання результатів дисертаційної роботи

А.1 Довідка про використання результатів в НДР



30.12.2025 а 03/810

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD)
в галузі знань 12 Інформаційні технології
за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки
БУРЕНКА Володимира Олександровича

Довідка видана у тому, що у науковій діяльності Чорноморського національного університету імені Петра Могили використано наукові результати дисертаційної роботи Буренка Володимира Олександровича, які увійшли складовими до остаточних звітів з держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР), що проводилися в ЧНУ ім. Петра Могили:

- «Розроблення найсучаснішого інтерактивного навчально-тренажерного та аналітично-консультативного комплексу військово-цивільного призначення» (№ держ. реєстрації 0118U000193);
- «Розробка інформаційно-комунікаційних технологій підтримки прийняття стратегічних рішень військово-цивільного призначення в умовах багатокритеріальності та невизначеності» (№ держ. реєстрації 0117U007144).

Проректор з наукової роботи
ЧНУ ім. Петра Могили,
д-р техн. наук, професор



Роман ДІНЖОС

А.2 Акт впровадження результатів в навчальний процес



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
 ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА**

54007 м. Миколаїв, пр. Героїв України 9, тел./факс +38(0512) 42-42-80, e-mail: university@nuos.edu.ua



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з НР, професор

Геннадій ПАВЛОВ

" 2025 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD)

у галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки
 Буренка Володимира Олександровича

Результати дисертаційної роботи Буренка В. О. використовуються у навчальному процесі Навчально-наукового інституту комп'ютерних наук та управління проектами (ННІКНУП) Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при викладанні дисциплін:

- «Методи та моделі прийняття рішень в управлінні проектами» здобувачам за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки галузі знань 12 Інформаційні технології, ОПП «Управління проектами» (ОК 8);
- «Математичне моделювання систем і процесів та методи оптимізації» здобувачам за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки галузі знань 12 Інформаційні технології, ОПП «Комп'ютерні науки» (ОКЗ 2).

Директор ННІКНУП,
 канд. техн. наук, професор НУК

Тетяна ФАРІОНОВА

Завідувач кафедри управління проектами,
 д-р техн. наук, професор

Сергій ЧЕРНОВ

Завідувач кафедри ІУСТ,
 канд. техн. наук, доцент

Ігор МИХЕЛЄВ

А.3 Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у компанії ТОВ «С&NT»



Товариство з обмеженою відповідальністю "Сі Ен Ті"
54001 м. Миколаїв, вул. Спаська, 52/1
ЄДРПОУ 34234214, тел. 0512 58-44-58
www.cnt.mk.ua, e-mail: cnt@cnt.mk.ua

Вих 04/11 від 24.11.2025р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD)
аспіранта Національного університету кораблебудування
ім. адмірала Макарова
Буренка Володимира Олександровича

Результати дисертаційної роботи Буренка В. О. «Математичні моделі для обробки інформації в комп'ютерних системах енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж» впроваджені на ТОВ «Сі Ен Ті» в роботу Сервісного центру компанії.

При наданні послуг з монтажу та обслуговування систем відеоспостереження та мереж були використані такі результати, отримані Буренком В. О. особисто:

1) математична модель наповненості окремого кадру відеопотоку з IP-камер системи відеоспостереження, що дозволяє визначити індекс наповненості кадру та зменшити обчислювальну складність прийнятого рішення щодо подій на підлеглий території огляду;

2) математична модель оптимізованого енергоспоживання у локальних пунктах оброблення зображень диспетчерами системи відеоспостереження засобами IoT-пристроїв (на планшетах, смартфонах тощо), що дозволяє збільшити час енергонезалежності обладнання системи відеоспостереження та IoT-пристроїв як хостів інформаційно-вимірювальної мережі (ІВМ);

3) комп'ютерна програма перетворення зображення з IP-камери на гістограму яскравості, що дозволяє діагностувати появу людей та/або рухомих об'єктів в кадрі без виконання складних процедур сегментації або детекції із залученням нейронних мереж. Також цей підхід дозволяє ефективно враховувати появу людей навіть за складних умов освітлення при значній економії обчислювальних та енергоресурсів.

Отримані результати дозволили покращити ефективність функціонування інформаційно-вимірювальних мереж на базі технологій та обладнання для відеоспостереження та досягти збільшення часу енергонезалежності хостів ІВМ на 12 % порівняно із традиційними підходами, заснованими на розпізнаванні облич на зображеннях.

Цей Акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Директор



Карбовський Ю.В.

А.4 Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у КП «Міський інформаційно-обчислювальний центр» Миколаївської міської ради

МИКОЛАЇВСЬКА МІСЬКА РАДА

Комунальне підприємство

«Міський інформаційно-обчислювальний центр»

вул. Адміральська, 20, м. Миколаїв, 54027, тел. (0512) 70-93-71

E-mail: digital@mkrada.gov.ua

Код ЄДРПОУ 31554081

18.01.2026

№

01-18/01/2026

На №

від

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» Буренка Володимира Олександровича «Математичні моделі для обробки інформації в комп'ютерних системах енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж»

Я, що нижче підписався, директор КП «Міський інформаційно-обчислювальний центр» Богаченко Євгеній Валерійович, цим Актом засвідчую, що результати дисертації Буренка Володимира Олександровича, а саме: обчислювальний модуль у вигляді Python-скрипта для автоматичного аналізу зображень та методику використання отриманих даних для уточнення транспортної моделі міста, було впроваджено в роботу КП «Міський інформаційно-обчислювальний центр».

Використання зазначених результатів у комплексі з муніципальною системою відеоспостереження в межах концепції «розумне місто» дозволило досягти наступних результатів:

Впровадження зазначених вище результатів у комплексі з діючою системою міського відеоспостереження в межах розвитку концепції «розумне місто» дозволило отримати позитивні практичні результати за наступними напрямками:

Автоматизований аналіз пасажиропотоку за допомогою Python-скрипта:

Інтеграція розробленого автором ПЗ у діючу мережу камер відеоспостереження забезпечила можливість автоматичного обчислення рівня наповненості зупинок громадського транспорту. Використання статистичних моделей аналізу зображень замість складних нейромереж дозволило стабільно функціонувати системі в умовах обмежених ресурсів обладнання інформаційно-вимірювальної мережі «розумного міста».

Апробаційне коригування транспортної моделі та підготовка до диспетчеризації:

Дані, отримані в ході роботи обчислювального модуля, були використані для апробаційного коригування діючої транспортної моделі міста. Це дозволило уточнити параметри завантаженості ключових вузлів транспортної мережі та виявити критичні точки перевантаження. Отримані результати та статистичні масиви будуть використані при впровадженні міської системи диспетчеризації пасажирського транспорту для автоматизації процесів управління випуском транспортних засобів на маршрути.

Енергонезалежність вузлів моніторингу в точках із резервним живленням:

Математична модель оптимізованого енергоспоживання IoT-пристроїв була використана в точках моніторингу, обладнаних системами резервного живлення. Застосування алгоритму розподілу обчислень між ядрами процесора надало позитивні результати щодо суттєвого збільшення часу їхньої енергонезалежності, що забезпечило безперервний збір аналітичних даних для системи «розумне місто» навіть під час стабілізаційних відключень електроенергії.

Проведена оцінка підтвердила технічну спроможність запропонованих рішень та їхню високу практичну цінність для цифровізації міського середовища. Впровадження результатів дисертації Буренка В. О. сприяє цифровізації транспортної системи міста та відповідає стратегії розвитку Smart City.

Директор

Богаченко +380669727434



Євгеній БОГАЧЕНКО

ДОДАТОК Б

Список опублікованих наукових праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації та відповідають п. 8 Постанови КМУ від 12.01.2022 № 44

1. Буренко В. О., Чернов С. К. Синтез групових рішень для рішення задачі вибору транспортних засобів в процесі логістичного забезпечення міських пасажироперевезень. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами.* 2025. № 1 (10). С. 18–28. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2025.10.3>. Кат. Б.
2. Буренко В. О. Групові експертні оцінки обробки інформації в комп'ютерних системах «розумного міста». *Вісник Херсонського національного технічного університету.* 2024. № 2 (89). С. 118–125. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.16>. Кат. Б
3. Буренко В. О. Аналіз наповненості зупинок пасажирського транспорту за допомогою алгоритмів обробки зображень з IP-камер «розумного міста». *Вісник Хмельн. нац. ун-ту. Серія: Технічні науки.* 2023. Т. 1, № 5. С. 47–52. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-325-5>. Кат. Б
4. Bozhatkin S., Guseva-Bozhatkina V., Farionova T., Pasiuk B., Burenko V. Emergency notification computer system via telecommunication equipment of the organization's local network. *Computer systems and information technologies.* 2023. Vol. 1, no. 10. P. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2023-1-3>. Кат. Б
5. Журавська І. М., Савінов В. Ю., Корецька О. О., Буренко В. О. Розподілення навантаження між багатоядерними обчислювачами для задач енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж. *Наукові праці / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили.: наук. журн. Миколаїв, 2017. Т. 307, Вип. 295. С. 42–46 (Серія : Комп'ютерні технології).* URL: <https://journals.indexcopernicus.com/search/article?articleId=1814745>. Фахове видання. (немає DOI, але опубл. ДО Постанови КМУ № 44)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

– друковані праці конференцій, які включені до міжнародних наукометричних баз

6. Obukhova K., Zhuravska I., Burenko V. Diagnostics of power consumption of a mobile device multi-core processor with detail of each core utilization. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* : Proc. of the 2020 IEEE 15th Int. Conf., Lviv, Ukraine, Feb. 25–29, 2020 / Lviv Polytechnic National University. P. 368–372. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235456>. ISBN (IEEE): 978-1-7281-5566-1. Scopus EID: 2-s2.0-85085479130. WoS ID: 000578041000077.

– інші матеріали конференцій

7. Burenko V. O., Guseva-Bozhatkina V. A. Development of models for the decision-making process regarding the choice of urban passenger vehicles. *SWorld-Ger Conference on Future in the results of modern scientific research*, Germany, Karlsruhe, 20 Aug. 2025. P. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.30890/2709-1783.2025-40-00-003>. URL: <https://www.proconference.org/index.php/gec/issue/view/gec40-00/gec40-00> (Last accessed: 20.10.2025).

8. Буренко В. О. Моделювання подачі та завантаження міського транспорту на основі даних системи «Розумне місто». *Ольвійський форум – 2025: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі* : тези доп. XXII Міжнар. наук. конф., Миколаїв, 16–21 черв. 2025 р. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2025. С. 52–55. DOI: <https://doi.org/10.34132/mspc2025.01.06.09>. URL: <https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/2830> (дата звернення: 27.06.2025).

9. Буренко В. О. Використання технології Інтернету речей для підрахування людей на зупинках міського транспорту у системі «розумне місто». *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг (MSIE-2024)* : тези доп. VIII Міжнар. наук.-практ. конф. / Київ. нац. ун-т технологій та дизайну, Київ, 07 листопада 2024 р. Київ, 2024. С. 187–188. URL:

https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/28607/1/Mechatronic%20systems_MSIE%202024.pdf (дата звернення: 27.03.2025).

10. Буренко В. О., Гусєва-Божаткіна В. А. Обробка інформації з комп'ютерної системи «розумне місто» для подачі евакотранспорту в умовах воєнного стану. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : тези доп. XV Міжнар. наук.-техн. конф. / Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, 26–27 вересня 2024 р. Миколаїв : НУК, 2024. С. 602–605. URL: <https://rep.nuos.edu.ua/server/api/core/bitstreams/59e5722f-538b-450b-ad94-7316f21bfbfb/content> (дата звернення: 01.11.2024).

11. Буренко В. О. Алгоритми обробки зображень в інформаційно-вимірювальній мережі моніторингу наповненості зупинок пасажирського транспорту. *Інформаційні технології і автоматизація – 2023* : тези доп. XVI Міжнар. наук.-практ. конф. / Одес. нац. технолог. ун-т, Одеса, 19–20 жовтня 2023 р. Одеса : Вид-во ОНТУ, 2023. С. 35–37. URL: <https://ontu.edu.ua/itia> (дата звернення: 30.10.2024).

12. Буренко В. О. Інформаційні технології аналізування потреби та управління транспортними пасажиропотоками в smart-city. *Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій* : матеріали XXIII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів / Одес. нац. технолог. ун-т, Одеса, 20–21 квітня 2023 р. Одеса : Вид-во ОНТУ, 2023. С. 207–208. URL: <https://card-file.ontu.edu.ua/items/0e304d93-0867-4813-87b5-f4a6e7ef2826> (дата звернення: 18.12.2025).

13. Божаткін С. М., Буренко В. О. Достовірність передачі даних в інформаційних системах управління живленням за допомогою Wi-Fi. *Сучасні проблеми інформаційної безпеки на транспорті* : зб. тез V Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю, Миколаїв, 26–28 листопада 2015 р. С. 100–101.

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації

14. Burenko V. O. Planning of urban transport delivery according to data from the non-volatile information-measurement network of the Smart City. *Modern*

engineering and innovative technologies. 2025. Is. 40. P. 106–120. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2025-40-01-026>. ISSN 2567-5273. URL: <https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit40-01/meit40-01> **ОЕСР (Німеччина)**

15. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 139638. Комп'ютерна програма «PASSENGER COUNTING VIA IP CAMS» : комп'ютерна програма / В. О. Буренко ; дата реєстр. 23.09.2025 ; опубл. 31.10.2025, Бюл. № 94. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1883726/>.

16. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 139134. Комп'ютерна програма «BRIGHTNESS_HISTOGRAM» : комп'ютерна програма / В. О. Буренко, В. А. Гусєва-Божаткіна ; дата реєстр. 28.08.2025 ; опубл. 30.09.2025, Бюл. № 93. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1878768/>.

17. Гусєва-Божаткіна В. А., Фаріонова Т. А., Божаткін С. М., Буренко В. О. Спосіб індивідуальної активізації освітлювальних ламп, підключених до освітлювальної системи з мікропроцесорним управлінням з живленням від однофазної мережі. Пат. на корисну модель 133447 Україна, МПК Н05В 39/04 (2006.01). № u201810299 ; заявл. 17.10.2018 ; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 7/2019. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1344750/>.

ДОДАТОК В

Розрахунок індексу $SFI(t)$ на основі аналізу кадрів з ІР-камер

В.1 Результати розрахунків для маршруту № 16 М/н Намив — ПАТ «Завод фільтруючого і мастильного обладнання»

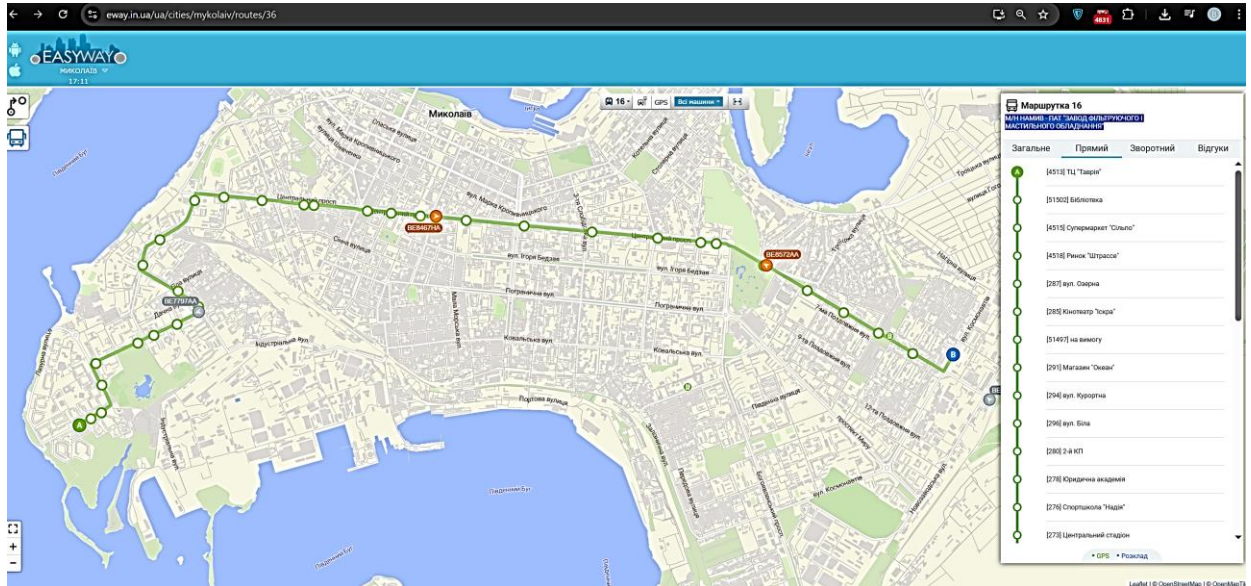
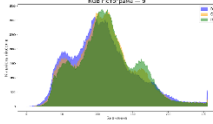
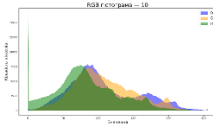
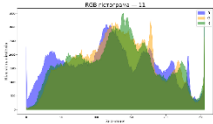
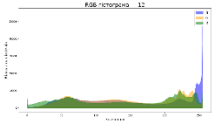
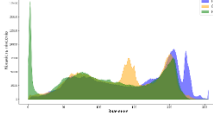
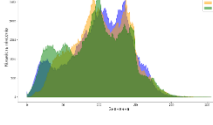
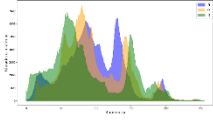
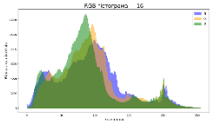
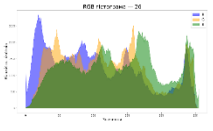
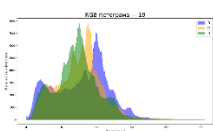
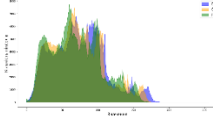
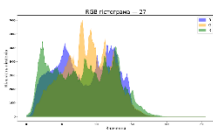
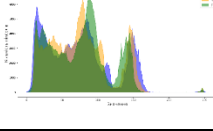
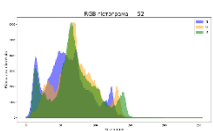
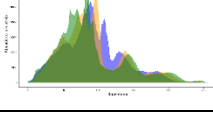
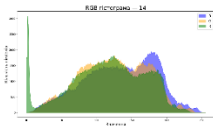
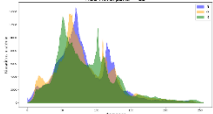


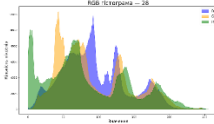
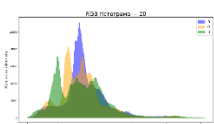
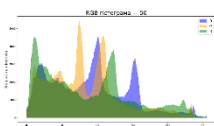
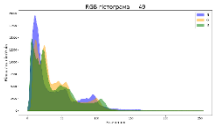
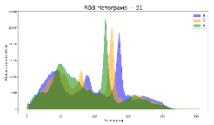
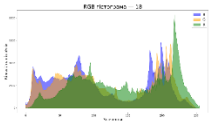
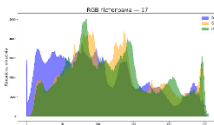
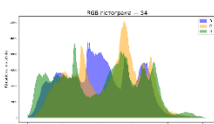
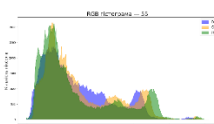
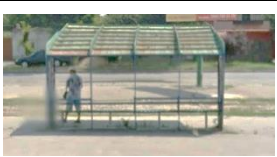
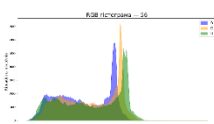
Рисунок В.1 – Схема зупинок маршруту № 16 на мапі

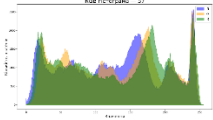
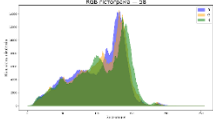
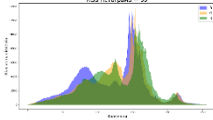
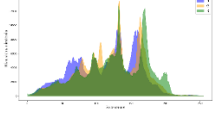
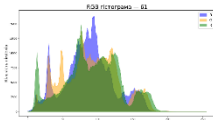
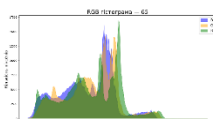
А [4513] ТЦ "Таврія" – [51502] Бібліотека – **BE8467HA** – [4515] Супермаркет "Сільпо" – [4518] Ринок "Штрассе" – [287] вул. Озерна – [285] Кінотеатр "Іскра" – [51497] на вимогу – [291] Магазин "Океан" – [294] вул. Курортна – [296] вул. Біла – [280] 2-й КП – [278] Юридична академія – [276] Спортшкола "Надія" – [273] Центральний стадіон – [271] вул. Водопровідна – [51383] Торгівельний центр – [3576] Центральний ринок – [297] вул. Аркасівська – [51384] вул. Захисників Миколаєва – [298] вул. Соборна – [300] вул. Московська – [301] вул. Мала Морська – [304] вул. Садова – [308] вул. 3-я Слобідська – [310] вул. 6-а Слобідська – [313] вул. 9-а Слобідська – [314] вул. 10-а Слобідська – [316] вул. 2-а Інгульська – [3702] вул. Будівельників – [3701] вул. 3-я Лінія – **BE8572AA** – [3698] вул. Генерала Свиридова – [3696] вул. 9-а Лінія – **В** [3695] Магазин "Світанок"

Таблиця В.1 – Розрахунок індексу $SFI_n(17:30)$ для маршруту № 16

Назва зупинки	Фото зупинки	RGB-гістограма яскравості	Ентропія $H(t)$	Контраст $\sigma(t)$	Міжкадрова різниця $D_{diff}(t)$	Інтегральний індекс наповненості кадру $SFI(t)$	Нормований індекс $SFI_n(t)$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
А [4513] ТЦ "Таврія"			7,39	42,81	2,25	712,88	8,73
[51502] Бібліотека			7,34	41,57	5,22	1593,45	19,52
[4515] Супермаркет "Сільпо"			7,77	56,79	11,50	5073,84	62,17
[4518] Ринок "Штрассе"			7,79	72,23	12,95	7289,23	89,31
[287] вул. Озерна			7,59	56,08	15,91	6771,93	82,98
[285] Кінотеатр "Іскра"			7,31	39,80	25,99	7560,19	92,63
[51497] на вимогу			7,21	43,96	10,94	3468,73	42,50
[291] Магазин "Океан"			7,34	45,64	6,47	2165,36	26,53

Назва зупинки	Фото зупинки	RGB-гістограма яскравості	Ентропія $H(t)$	Контраст $\sigma(t)$	Міжкадрова різниця $D_{diff}(t)$	Інтегральний індекс наповненості кадру $SFI(t)$	Нормований індекс $SFI_n(t)$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
[294] вул. Курортна			7,78	64,43	4,94	2476,14	30,34
[296] вул. Біла			6,90	30,43	17,66	3708,81	45,44
[280] 2-й КП			7,02	34,44	28,74	6946,02	85,11
[278] Юридична академія			7,11	35,20	4,04	1011,64	12,40
[276] Спортшкола "Надія"			7,08	42,15	17,59	5250,90	64,34
[273] Центральний стадіон			6,83	30,51	20,67	4306,61	52,77
[271] вул. Водопровідна			7,29	44,10	9,60	3088,43	37,84
[51383] Торгівельний центр			7,53	46,62	11,41	4006,06	49,09
[3576] Центральний ринок			7,25	41,52	26,79	8061,12	98,77

Назва зупинки	Фото зупинки	RGB-гістограма яскравості	Ентропія $H(t)$	Контраст $\sigma(t)$	Міжкадрова різниця $D_{diff}(t)$	Інтегральний індекс наповненості кадру $SFI(t)$	Нормований індекс $SFI_n(t)$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
[297] вул. Аркасівська			7,37	51,48	13,74	5215,96	63,91
[51384] вул. Захисників Миколаєва			6,85	32,57	19,27	4298,68	52,67
[298] вул. Соборна			7,47	52,09	17,67	6873,34	84,22
[300] вул. Московська			6,52	30,59	4,99	995,56	12,20
[301] вул. Мала Морська			7,36	47,89	9,18	3235,78	39,65
[304] вул. Садова			7,72	66,19	16,27	8311,69	101,84
[308] вул. 3-я Слобідська			7,77	60,25	17,78	8320,20	101,95
[310] вул. 6-а Слобідська			7,52	50,06	2,89	1086,93	13,32
[313] вул. 9-а Слобідська			7,21	49,87	7,68	2761,37	33,83
[314] вул. 10-а Слобідська			6,92	39,93	9,71	2684,52	32,89

Назва зупинки	Фото зупинки	RGB-гістограма яскравості	Ентропія $H(t)$	Контраст $\sigma(t)$	Міжкадрова різниця $D_{diff}(t)$	Інтегральний індекс наповненості кадру $SFI(t)$	Нормований індекс $SFI_n(t)$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
[316] вул. 2-а Інгульська			7,82	70,59	4,19	2314,94	28,36
[3702] вул. Будівельників			7,08	37,14	6,15	1618,83	19,84
[3701] вул. 3-я Лінія			7,30	42,04	12,80	3929,49	48,15
[3698] вул. Генерала Свиридова			7,31	43,27	11,69	3698,68	45,32
[3696] вул. 9-а Лінія			7,10	37,79	17,63	4730,09	57,96
В [3695] Магазин "Світанок"			7,05	37,78	18,12	4824,61	59,12

Середній відсоток наповненості зупинок маршруту № 16 о 17:30:

$$SFI_{n_сер}(17:30) = 51,38 \%$$

В.2 Результати розрахунків для маршруту № 56 М/н Намив – М/н Північний

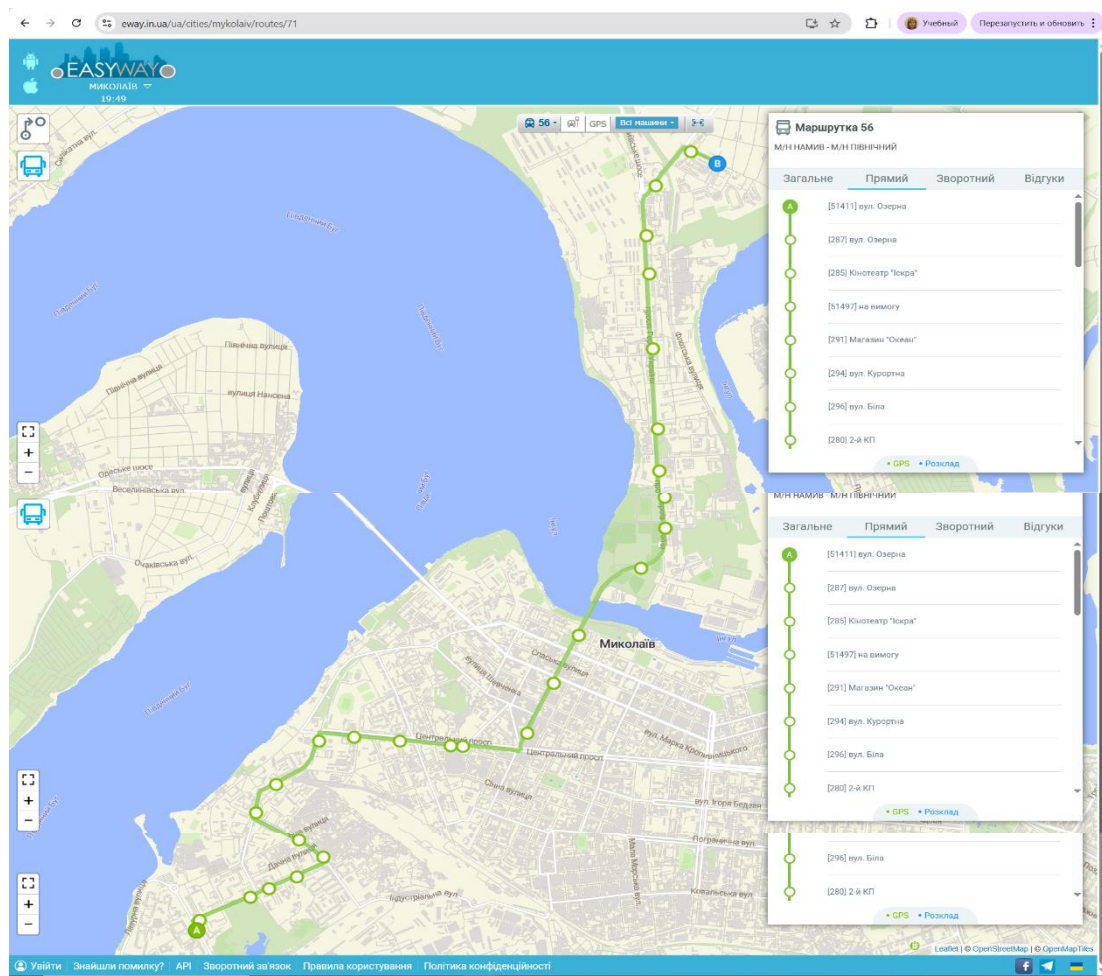
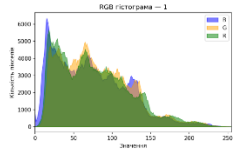
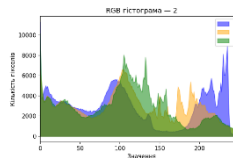
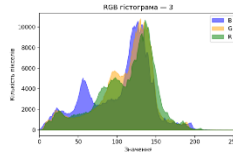
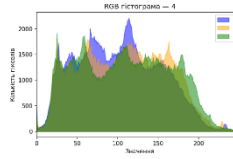
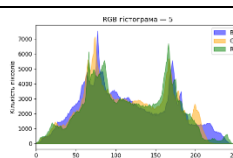
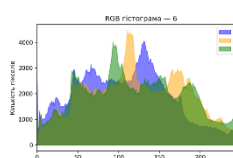
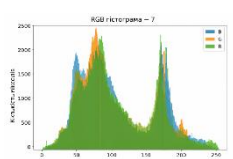
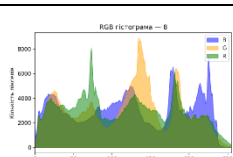
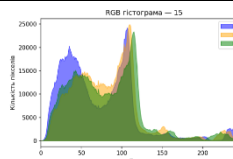
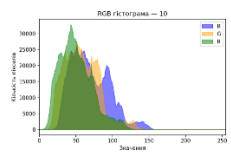
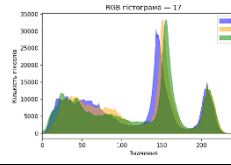
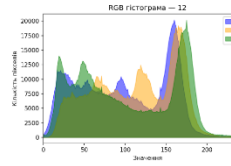
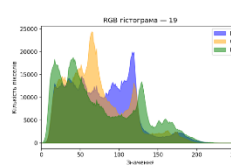
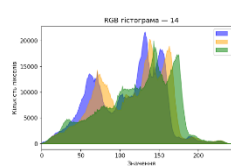
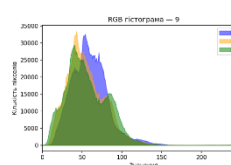
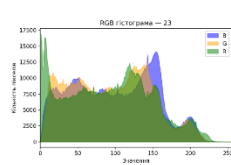
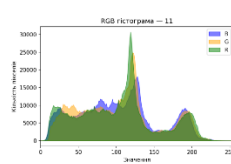
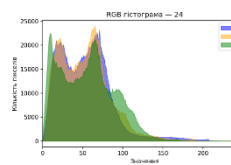


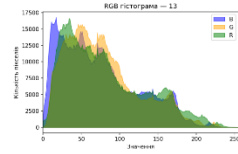
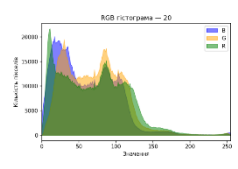
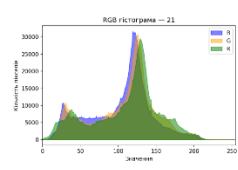
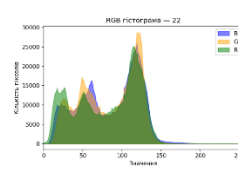
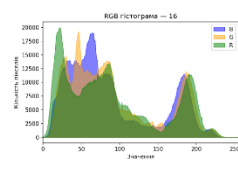
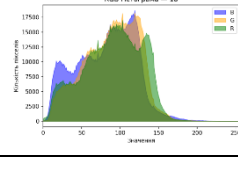
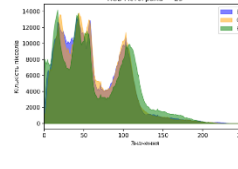
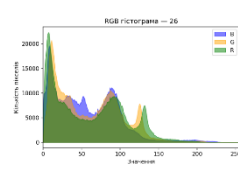
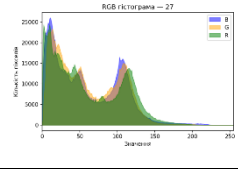
Рисунок В.2 – Схема зупинок маршруту № 56 на мапі

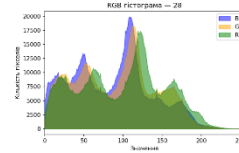
А [51411] вул. Озерна – [287] вул. Озерна – [285] Кінотеатр "Іскра" – [51497] на вимогу – [291] Магазин "Океан" – [294] вул. Курортна – [296] вул. Біла – [280] 2-й КП – [278] Юридична академія – [276] Спортшкола "Надія" – [273] Центральний стадіон – [271] вул. Водопровідна – [51383] Торгівельний центр – [3576] Центральний ринок – [266] вул. Аркасівська – [263] вул. Кропивницького – [23] вул. Адміральська – [21] Парк Перемоги – [18] НУК імені адмірала Макарова – [17] Супермаркет "Метро" – [14] Плавбасейн – [13] Млинна – [10] Шкільна – [8] Гвардійська – [7] Ательє – [5] Автостанція "Оріон" – [51258] вул. Архітектора Старова – **В** [2] м/н Північний

Таблиця В.2 – Розрахунок індексу $SFI_n(17:30)$ для маршруту № 56

Назва зупинки	Фото зупинки	RGB-гістограма яскравості	Ентропія $H(t)$	Контраст $\sigma(t)$	Міжкадрова різниця $D_{diff}(t)$	Інтегральний індекс наповненості кадру $SFI(t)$	Нормований індекс $SFI_n(t)$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
А [51411] вул. Озерна			7,35	45,23	32,97	10959,07	61,71
[287] вул. Озерна			7,81	65,00	45,52	23120,06	130,19
[285] Кінотеатр "Іскра"			7,07	37,38	34,52	9121,54	51,36
[51497] на вимогу			7,64	52,13	47,80	19025,00	107,13
[291] Магазин "Океан"			7,52	50,59	45,60	17336,38	97,62
[294] вул. Курортна			7,74	56,82	31,20	13718,16	77,25
[296] вул. Біла			7,71	71,55	51,31	28308,86	159,41
[280] 2-й КП			7,75	63,11	29,34	14352,12	80,82
[278] Юридична академія			7,18	43,32	24,97	7765,53	43,73

Назва зупинки	Фото зупинки	RGB-гістограма яскравості	Ентропія $H(t)$	Контраст $\sigma(t)$	Міжкадрова різниця $D_{diff}(t)$	Інтегральний індекс наповненості кадру $SFI(t)$	Нормований індекс $SFI_n(t)$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
[276] Спортшкола "Надія"			6,46	23,09	55,18	8232,00	46,36
[273] Центральний стадіон			7,40	62,21	27,40	12608,59	71,00
[271] вул. Водопровідна			7,43	51,83	17,41	6700,93	37,73
[51383] Торгівельний центр			7,20	40,33	32,92	9556,52	53,81
[3576] Центральний ринок			7,33	42,30	18,04	5595,75	31,51
[266] вул. Аркасівська			6,56	26,36	79,25	13701,95	77,16
[263] вул. Кропивницького			7,60	53,43	25,32	10287,05	57,93
[23] вул. Адміральська			7,47	51,82	30,60	11840,36	66,67
[21] Парк Перемоги			6,82	30,70	57,00	11936,07	67,21

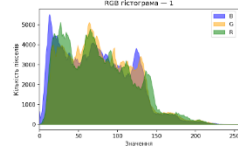
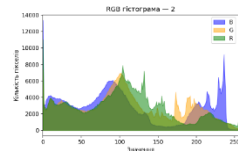
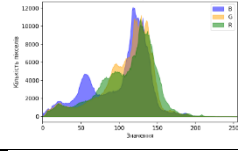
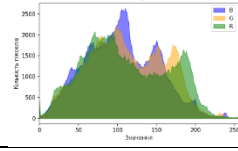
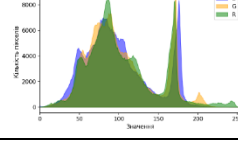
Назва зупинки	Фото зупинки	RGB-гістограма яскравості	Ентропія $H(t)$	Контраст $\sigma(t)$	Міжкадрова різниця $D_{diff}(t)$	Інтегральний індекс наповненості кадру $SFI(t)$	Нормований індекс $SFI_n(t)$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
[18] НУК імені адмірала Макарова			7,40	47,23	31,10	10875,39	61,24
[17] Супермаркет "Метро"			7,17	39,95	28,68	8209,41	46,23
[14] Плавбасейн			7,24	42,68	36,15	11173,55	62,92
[13] Млинна			6,92	37,15	44,59	11468,08	64,58
[10] Шкільна			7,45	58,91	16,07	7050,90	39,70
[8] Гвардійська			7,11	35,25	22,31	5587,57	31,46
[7] Ательє			7,08	39,59	48,60	13630,14	76,75
[5] Автостанція "Оріон"			7,07	42,03	47,61	14151,41	79,69
[51258] вул. Архітектора Старова			7,07	42,21	39,10	11675,01	65,74

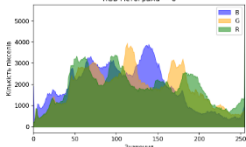
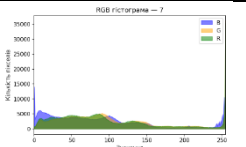
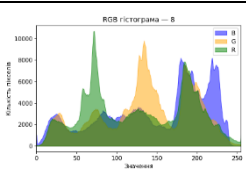
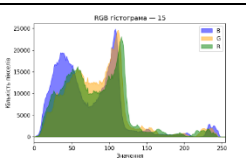
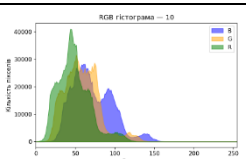
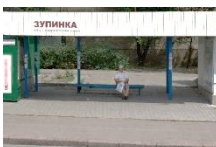
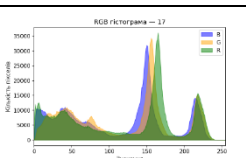
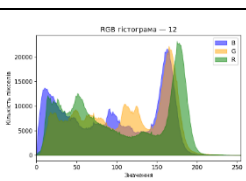
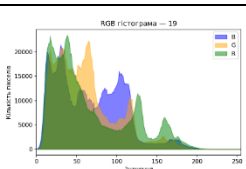
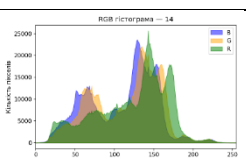
Назва зупинки	Фото зупинки	RGB-гістограма яскравості	Ентропія $H(t)$	Контраст $\sigma(t)$	Міжкадрова різниця $D_{diff}(t)$	Інтегральний індекс наповненості кадру $SFI(t)$	Нормований індекс $SFI_n(t)$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
В [2] м/н Північний			7,53	50,50	35,06	13328,55	75,05

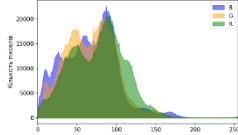
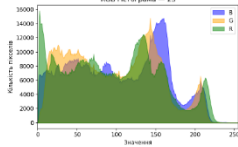
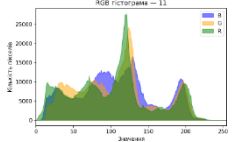
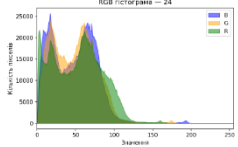
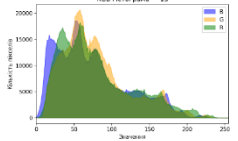
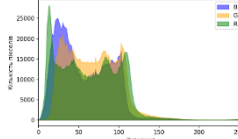
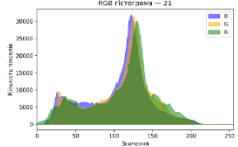
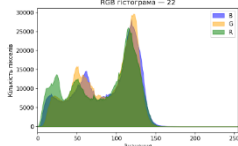
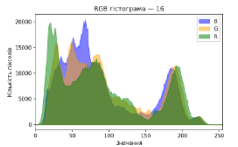
Середній відсоток наповненості зупинок маршруту № 56 о 17:30:

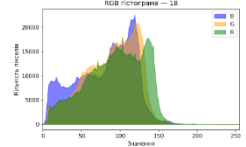
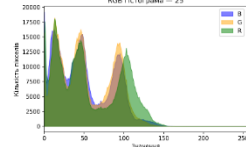
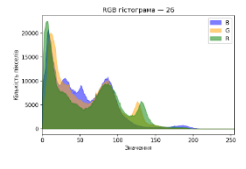
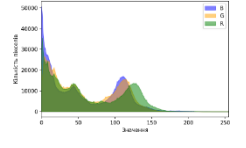
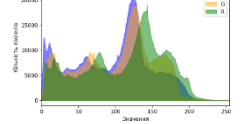
$$SFI_{n_сер}(17:30) = 68,64 \text{ \%}.$$

Таблиця В.3 – Розрахунок індексу $SFI_n(18:00)$ для маршруту № 56

Назва зупинки	Фото зупинки	RGB-гістограма яскравості	Ентропія $H(t)$	Контраст $\sigma(t)$	Міжкадрова різниця $D_{diff}(t)$	Інтегральний індекс наповненості кадру $SFI(t)$	Нормований індекс $SFI_n(t)$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
А [51411] вул. Озерна			7,32	43,08	15,00	4728,25	26,63
[287] вул. Озерна			7,81	63,80	1,00	498,41	2,81
[285] Кінотеатр «Іскра»			6,99	35,31	5,00	1234,44	6,95
[51497] на вимогу			7,57	48,44	1,00	366,50	2,06
[291] Магазин «Океан»			7,16	42,28	1,00	302,60	1,70

Назва зупинки	Фото зупинки	RGB-гістограма яскравості	Ентропія $H(t)$	Контраст $\sigma(t)$	Міжкадрова різниця $D_{diff}(t)$	Інтегральний індекс наповненості кадру $SFI(t)$	Нормований індекс $SFI_n(t)$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
[294] вул. Курортна			7,81	59,11	8,00	3694,61	20,80
[296] вул. Біла			7,64	69,54	1,00	531,01	2,99
[280] 2-й КП			7,63	57,00	1,00	434,80	2,45
[278] Юридична академія			7,17	42,65	5,00	1529,00	8,61
[276] Спортшкола «Надія»			6,37	21,85	48,00	6682,95	37,63
[273] Центральний стадіон			7,39	69,49	2,00	1027,62	5,79
[271] вул. Водопровідна			7,43	55,83	1,00	414,59	2,33
[51383] Торгівельний центр			7,08	39,31	10,00	2782,36	15,67
[3576] Центральний ринок			7,28	42,14	1,00	306,91	1,73

Назва зупинки	Фото зупинки	RGB-гістограма яскравості	Ентропія $H(t)$	Контраст $\sigma(t)$	Міжкадрова різниця $D_{diff}(t)$	Інтегральний індекс наповненості кадру $SFI(t)$	Нормований індекс $SFI_n(t)$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
[266] вул. Аркасівська			6,97	31,75	15,00	3320,89	18,70
[263] вул. Кропивницького			7,62	56,49	7,00	3012,78	16,97
[23] вул. Адміральська			7,46	52,04	1,00	388,37	2,19
[21] Парк Перемоги			6,66	27,96	12,00	2233,89	12,58
[18] НУК імені адмірала Макарова			7,29	44,49	1,00	324,51	1,83
[17] Супермаркет «Метро»			6,91	34,53	1,00	238,50	1,34
[14] Плавбасейн			7,19	41,28	23,00	6830,27	38,46
[13] Млинна			6,92	37,48	9,00	2334,25	13,14
[10] Шкільна			7,46	58,69	4,00	1751,78	9,86

Назва зупинки	Фото зупинки	RGB-гістограма яскравості	Ентропія $H(t)$	Контраст $\sigma(t)$	Міжкадрова різниця $D_{diff}(t)$	Інтегральний індекс наповненості кадру $SFI(t)$	Нормований індекс $SFI_n(t)$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
[8] Гвардійська			7,05	34,72	5,00	1223,19	6,89
[7] Ательє			6,76	35,21	13,00	3095,17	17,43
[5] Автостанція «Оріон»			7,01	40,20	17,00	4789,95	26,97
[51258] вул. Архітектора Старова			7,06	45,99	11,00	3570,07	20,10
В [2] м/н Північний			7,51	51,72	19,00	7375,01	41,53

Середній відсоток наповненості зупинок маршруту № 56 о 18:00:

$$SFI_{n_сер}(18:00) = 13,08 \, \%$$

ДОДАТОК Г

Основні метрики теорії свідочств

Для кожної пари $\langle m_i, m_j \rangle$; $i, j = \overline{1, t}$; $i \neq j$ визначаються оцінки однієї з метрик (В.1)–(В.6), в яких відстань $d(m_1, m_2) \in [0; 1]$ є мірою відмінності між двома групами свідочств:

1) відстань Тессема (Tessema's distance) [33]¹:

$$d_T(m_1, m_2) = \max_{A_i \in A} \{|BetP_1(A_i) - BetP_2(A_i)|\}, \quad (B.1)$$

де пігністична ймовірність $BetP_m(A_i) = \sum_{B \subseteq A, A_i \in B} \frac{1}{|B|} \frac{m(B)}{(1-m(\emptyset))}$ [16]. На відміну від

відстані Джоссельме, відстань Тессема базується на попередньому перетворенні мас свідчень у пігністичні ймовірності (pignistic probabilities). Після такого перетворення ($BetP$) розраховується відстань між отриманими векторами ймовірностей. Особливість: оскільки відстань Тессема передбачає перехід від інтервальних значень до точкових ймовірностей, це може призводити до певної втрати інформації про початкову невизначеність, проте вона є простішою для обчислень у задачах прийняття рішень. Використовується разом із іншими метриками для порівняльного аналізу або групування експертних оцінок;

а) відстань Джоссельме (Jousselme distance) [34–36]:

$$d_J(m_1, m_2) = \sqrt{\frac{1}{2} (m_1 - m_2)^T \underline{D} (m_1 - m_2)}, \quad (B.2)$$

де $(m_1 - m_2)$ – різниця векторів;

$\underline{D}$ – матриця $2^{|\Omega|} \times 2^{|\Omega|}$, елементи якої визначаються як

$$D(B_i, B_j) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } B_i = B_j; \\ S(B_i, B_j), & \forall B_i, B_j \in A \end{cases}; \quad (B.3)$$

б) Евклідова відстань (Euclidean distance) [37]:

$$d_E(m_1, m_2) = \sqrt{\sum_{B \subseteq A} [(m_i(B) - m_j(B))]^2}; \quad (B.4)$$

в) відстань Бхаттачарія (Bhattacharyya distance) [36; 38]:

$$d_B(m_1, m_2) = \left[1 - \sum_{B \subseteq A} \sqrt{(m_i(B) \times m_j(B))} \right]^k, \quad k > 0; \quad (B.5)$$

г) відстань Ванга (Wang-Trojanowski distance) [39]:

$$d_W(m_1, m_2) = \sum_{B \subseteq A} \frac{|m_i(B) - m_j(B)|}{2}. \quad (B.6)$$

¹⁾ Номери джерел наведено відповідно до Списку використаних джерел до розділу 3

ДОДАТОК Д

Розрахунки знаходження вектора локальних пріоритетів

Д.1 За методом Чанга на основі оцінок експерта E_1

Обчислимо вектор локальних пріоритетів для всіх чотирьох аспектів моделі *ВОСР* (Вигоди – Витрати – Можливості – Ризики) за критеріями K_1 – K_{13} та альтернативами A_1 – A_{13}) на основі оцінок експерта E_1 .

Результати попарних порівнянь для всіх чотирьох аспектів наведені в табл. Д.1–Д.8.

Таблиця Д.1 – Результати попарних порівнянь альтернатив для аспекту «Вигоди»

Критерій K_1			Критерій K_2		
A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
A_1	(1; 1; 1)	(3/2; 2; 5/2)	(1; 1; 1)	(2/3; 1; 2)	(5/2; 3; 7/2)
A_2	(2/5; 1/2; 2/3)	(1; 1; 1)	(1/2; 1; 3/2)	(1; 1; 1)	(3/2; 2; 5/2)
A_3	(2/3; 1; 2)	(2/5; 1/2; 2/3)	(2/7; 1/3; 2/5)	(2/5; 1/2; 2/3)	(1; 1; 1)
Критерій K_3			Критерій K_4		
A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
A_1	(1; 1; 1)	(3/2; 2; 5/2)	(1; 1; 1)	(2; 5/2; 3)	(2/7; 1/3; 2/5)
A_2	(2/5; 1/2; 2/3)	(1; 1; 1)	(1/3; 2/5; 1/2)	(1; 1; 1)	(1/2; 1; 3/2)
A_3	(1/3; 2/5; 1/2)	(2/3; 1; 2)	(5/2; 3; 7/2)	(2/3; 1; 2)	(1; 1; 1)

Таблиця Д.2 – Результати попарних порівнянь критеріїв

	K_1	K_2	K_3	K_4
K_1	(1; 1; 1)	(1/2; 2/3; 1)	(2; 5/2; 3)	(1/3; 2/5; 1/2)
K_2	(1; 3/2; 2)	(1; 1; 1)	(1/2; 1; 3/2)	(2/3; 1; 2)
K_3	(1/3; 2/5; 1/2)	(2/3; 1; 2)	(1; 1; 1)	(5/2; 3; 7/2)
K_4	(2; 5/2; 3)	(1/2; 1; 3/2)	(2/7; 1/3; 2/5)	(1; 1; 1)

Вектор локальних пріоритетів альтернатив:

- за критерієм K_1 : $r_1 = (0,41; 0,34; 0,25)$;
- за критерієм K_2 : $r_2 = (0,58; 0,42; 0,00)$;
- за критерієм K_3 : $r_3 = (0,76; 0,08; 0,15)$;
- за критерієм K_4 : $r_4 = (0,36; 0,06; 0,58)$.

Вектор локальних пріоритетів критеріїв K_1 – K_4 : $w = (0,23; 0,24; 0,28; 0,25)$.

Підрахуємо кількісний індикатор якості кожної альтернативи для аспекту «Вигоди»: $U_1 = \sum_{j=1}^n w_j r_{j1} = 0,54$; $U_2 = 0,22$; $U_3 = 0,24$.

Таблиця Д.3 – Результати попарних порівнянь альтернатив для аспекту «Витрати»

	Критерій K_5			Критерій K_6		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
A_1	(1; 1; 1)	(1/2; 2/3; 1)	(1/2; 1; 3/2)	(1; 1; 1)	(2/3; 1; 2)	(1/3; 2/5; 1/2)
A_2	(1; 3/2; 2)	(1; 1; 1)	(2; 5/2; 3)	(1/2; 1; 3/2)	(1; 1; 1)	(3/2; 2; 5/2)
A_3	(2/3; 1; 2)	(1/3; 2/5; 1/2)	(1; 1; 1)	(2; 5/2; 3)	(2/5; 1/2; 2/3)	(1; 1; 1)
	Критерій K_7					
	A_1	A_2	A_3			
A_1	(1; 1; 1)	(2/3; 1; 2)	(1/3; 2/5; 1/2)			
A_2	(1/2; 1; 3/2)	(1; 1; 1)	(3/2; 2; 5/2)			
A_3	(2; 5/2; 3)	(2/5; 1/2; 2/3)	(1; 1; 1)			

Таблиця Д.4 – Результати попарних порівнянь критеріїв

	K_5	K_6	K_7
K_5	(1; 1; 1)	(2; 5/2; 3)	(2/5; 1/2; 2/3)
K_6	(1/3; 2/5; 1/2)	(1; 1; 1)	(2/3; 1; 2)
K_7	(3/2; 2; 5/2)	(1/2; 1; 3/2)	(1; 1; 1)

Вектор локальних пріоритетів альтернатив:

– за критерієм K_5 : $r_5 = (0,21; 0,59; 0,20)$;

– за критерієм K_6 : $r_6 = (0,20; 0,40; 0,40)$;

– за критерієм K_7 : $r_7 = (0,56; 0,34; 0,10)$.

Вектор локальних пріоритетів критеріїв K_5 – K_7 : $w = (0,40; 0,20; 0,40)$.

Підраховуємо кількісний індикатор якості кожної альтернативи для аспекту «Витрати»: $U_1 = 0,35$; $U_2 = 0,45$; $U_3 = 0,20$.

Таблиця Д.5 – Результати попарних порівнянь альтернатив для аспекту «Можливості»

	Критерій K_8			Критерій K_9		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
A_1	(1; 1; 1)	(1/2; 1; 3/2)	(3/2; 2; 5/2)	(1; 1; 1)	(1/2; 2/3; 1)	(5/2; 3; 7/2)
A_2	(2/3; 1; 2)	(1; 1; 1)	(1/3; 2/5; 1/2)	(1; 3/2; 2)	(1; 1; 1)	(2; 5/2; 3)
A_3	(2/5; 1/2; 2/3)	(2; 5/2; 3)	(1; 1; 1)	(2/7; 1/3; 2/5)	(1/3; 2/5; 1/2)	(1; 1; 1)
	Критерій K_{10}			Критерій K_{11}		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
A_1	(1; 1; 1)	(3/2; 2; 5/2)	(2; 5/2; 3)	(1; 1; 1)	(2/7; 1/3; 2/5)	(1/3; 2/5; 1/2)
A_2	(2/5; 1/2; 2/3)	(1; 1; 1)	(1; 3/2; 2)	(5/2; 3; 7/2)	(1; 1; 1)	(1/2; 1; 3/2)
A_3	(1/3; 2/5; 1/2)	(1/2; 2/3; 1)	(1; 1; 1)	(2; 5/3; 2)	(2/3; 1; 2)	(1; 1; 1)

Таблиця Д.6 – Результати попарних порівнянь критеріїв

	K_8	K_9	K_{10}	K_{11}
K_8	(1; 1; 1)	(2/5; 1/2; 2/3)	(2/3; 1; 2)	(1, 3/2, 2)
K_9	(3/2; 2; 5/2)	(1; 1; 1)	(1/2; 2/3; 1)	(1/2, 1, 3/2)
K_{10}	(1/2; 1; 3/2)	(1; 3/2; 2)	(1; 1; 1)	(2/5, 1/2, 2/3)
K_{11}	(1/2; 2/3; 1)	(1/2; 2/3; 1)	(3/2; 2; 5/2)	(1, 1, 1)

Вектор локальних пріоритетів альтернатив:

- за критерієм K_8 : $r_1 = (0,40; 0,20; 0,40)$;
- за критерієм K_9 : $r_2 = (0,47; 0,53; 0,00)$;
- за критерієм K_{10} : $r_3 = (0,00; 0,53; 0,47)$;
- за критерієм K_{11} : $r_4 = (0,36; 0,06; 0,58)$.

Вектор локальних пріоритетів критеріїв K_8 – K_{11} : $w = (0,24; 0,27; 0,23; 0,25)$.

Підрахуємо кількісний індикатор якості кожної альтернативи для аспекту «Можливості»: $U_1 = 0,42$; $U_2 = 0,37$; $U_3 = 0,21$.

Таблиця Д.7 – Результати попарних порівнянь альтернатив для аспекту «Ризики»

	Критерій K_{12}			Критерій K_{13}		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
A_1	(1; 1; 1)	(1/2; 2/3; 1)	(1/2; 1; 3/2)	(1; 1; 1)	(2/5; 1/2; 2/3)	(2; 5/2; 3)
A_2	(1; 3/2; 2)	(1; 1; 1)	(3/2; 2; 5/2)	(3/2; 2; 5/2)	(1; 1; 1)	(1; 3/2; 2)
A_3	(2/3; 1; 2)	(2/5; 1/2; 2/3)	(1; 1; 1)	(1/3; 2/5; 1/2)	(1/2; 2/3; 1)	(1;1;1)

Таблиця Д.8 – Результати попарних порівнянь критеріїв

	K_{12}	K_{13}
K_{12}	(1; 1; 1)	(2/3; 1; 2)
K_{13}	(1/2; 1; 3/2)	(1; 1; 1)

Вектор локальних пріоритетів альтернатив:

- за критерієм K_{12} : $r_1 = (0,25; 0,50; 0,25)$;
- за критерієм K_{13} : $r_2 = (0,45; 0,53; 0,02)$.

Вектор локальних пріоритетів критеріїв K_{12} – K_{13} : $w = (0,50; 0,50)$.

Підрахуємо кількісний індикатор якості кожної альтернативи для аспекту «Ризики»: $U_1 = 0,35$; $U_2 = 0,52$; $U_3 = 0,14$.

Д.2 За методом геометричного середнього основі оцінок експерта E_2

Обчислимо вектор локальних пріоритетів для всіх чотирьох аспектів моделі $BOCR$ (Вигоди – Витрати – Можливості – Ризики) за критеріями K_1 – K_{13} та альтернативами A_1 – A_{13}) на основі оцінок експерта E_2 .

Результати попарних порівнянь для всіх чотирьох аспектів наведені в табл. Д.9–Д.16.

Таблиця Д.9 – Результати попарних порівнянь альтернатив для аспекту «Вигоди»

	Критерій K_1			Критерій K_2		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
A_1	1	7	2	1	1/4	8
A_2	1/7	1	5	4	1	6
A_3	1/2	1/5	1	1/8	1/6	1
	Критерій K_3			Критерій K_4		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
A_1	1	3	8	1	6	1/9
A_2	1/3	1	5	1/6	1	2
A_3	1/8	1/5	1	9	1/2	1

Таблиця Д.10 – Результати попарних порівнянь критеріїв

	K_1	K_2	K_3	K_4
K_1	1	1/4	5	1/7
K_2	4	1	3	1/2
K_3	1/5	1/3	1	8
K_4	7	2	1/8	1

Вектор локальних пріоритетів альтернатив:

- за критерієм K_1 : $r_1 = (0,64; 0,24; 0,12)$,
- за критерієм K_2 : $r_2 = (0,29; 0,65; 0,06)$;
- за критерієм K_3 : $r_3 = (0,66; 0,27; 0,07)$;
- за критерієм K_4 : $r_4 = (0,27; 0,22; 0,51)$.

Вектор локальних пріоритетів критеріїв $w = (0,15; 0,37; 0,20; 0,27)$.

Підрахуємо кількісний індикатор якості кожної альтернативи для аспекту «Вигоди»: $U_1 = \sum_{j=1}^n w_j r_{j1} = 0,41$; $U_2 = 0,39$; $U_3 = 0,20$.

Таблиця Д.11 – Результати попарних порівнянь альтернатив для аспекту «Витрати»

	Критерій K_5			Критерій K_6		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
A_1	1	1/2	6	1	1/5	1/7
A_2	2	1	5	6	1	5
A_3	1/6	1/5	1	7	1/6	1
	Критерій K_7					
	A_1	A_2	A_3			
A_1	1	3	8			
A_2	1/3	1	4			
A_3	1/8	1/4	1			

Таблиця Д.12 – Результати попарних порівнянь критеріїв

	K_5	K_6	K_7
K_5	1	4	1/6
K_6	1/4	1	1/3
K_7	6	3	1

Вектор локальних пріоритетів альтернатив:

– за критерієм K_5 : $r_5 = (0,37; 0,55; 0,08)$;

– за критерієм K_6 : $r_6 = (0,07; 0,70; 0,24)$;

– за критерієм K_7 : $r_7 = (0,67; 0,26; 0,07)$.

Вектор локальних пріоритетів критеріїв $w = (0,22; 0,11; 0,67)$.

Підраховуємо кількісний індикатор якості кожної альтернативи для аспекту «Витрати»: $U_1 = 0,54$; $U_2 = 0,37$; $U_3 = 0,09$.

Таблиця Д.13 – Результати попарних порівнянь альтернатив для аспекту «Можливості»

	Критерій K_8			Критерій K_9		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
A_1	1	5	2	1	1/6	7
A_2	1/5	1	1/9	6	1	5
A_3	1/2	9	1	1/7	1/5	1
	Критерій K_{10}			Критерій K_{11}		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
A_1	1	3	5	1	1/7	1/9
A_2	1/3	1	6	7	1	3
A_3	1/5	1/6	1	9	1/3	1

Таблиця Д.14 – Результати попарних порівнянь критеріїв

	K_8	K_9	K_{10}	K_{11}
K_8	1	1/4	1/3	6
K_9	4	1	1/2	3
K_{10}	3	2	1	1/5
K_{11}	1/6	1/3	5	1

Вектор локальних пріоритетів альтернатив:

- за критерієм K_8 : $r_8 = (0,53; 0,07; 0,40)$;
- за критерієм K_9 : $r_9 = (0,27; 0,70; 0,07)$;
- за критерієм K_{10} : $r_{10} = (0,61; 0,31; 0,08)$;
- за критерієм K_{11} : $r_{11} = (0,06; 0,68; 0,35)$.

Вектор локальних пріоритетів критеріїв $w = (0,20; 0,37; 0,25; 0,17)$.

Підрахуємо кількісний індикатор якості кожної альтернативи для аспекту «Можливості»: $U_1 = 0,35$; $U_2 = 0,47$; $U_3 = 0,18$.

Таблиця Д.15 – Результати попарних порівнянь альтернатив для аспекту «Ризики»

	Критерій K_{12}			Критерій K_{12}		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
A_1	1	1/5	4	1	1/4	6
A_2	5	1	7	4	1	5
A_3	1/4	1/7	1	1/6	1/5	1

Таблиця Д.16 – Результати попарних порівнянь критеріїв

	K_{12}	K_{13}
K_{12}	1	1/5
K_{13}	5	1

Вектор локальних пріоритетів альтернатив:

- за критерієм K_{12} : $r_{12} = (0,20; 0,72; 0,07)$;
- за критерієм K_{13} : $r_{13} = (0,27; 0,65; 0,08)$.

Вектор локальних пріоритетів критеріїв $w = (0,17; 0,83)$.

Підрахуємо кількісний індикатор якості кожної альтернативи для аспекту: $U_1 = 0,26$; $U_2 = 0,66$; $U_3 = 0,08$.

ДОДАТОК Е

Вихідний код розробленого програмного забезпечення

Е.1 Код комп'ютерної програми «BRIGHTNESS_HISTOGRAM»

1) Файл get-brightness.js

```
const sharp = require('sharp');
const D3Node = require('d3-node');

const getBrightnessHistogram = (filePath) => {
  sharp(filePath)
    .grayscale()
    .raw()
    .toBuffer((err, data, info) => {
      if (err) {
        console.error(err);
        return;
      }
      const {width, height} = info;
      const numPixels = width * height;
      const histogram = Array(256).fill(0);

      for (let i = 0; i < numPixels; i++) {
        const offset = i;
        const brightness = data[offset];
        histogram[brightness]++;
      }

      const d3n = new D3Node();
      const svg = d3n.createSVG(800, 350);

      svg.append('rect')
        .attr('width', '100%')
        .attr('height', '100%')
        .attr('fill', 'white')
        .attr('padding-left', '20px');

      const margin = {top: 20, right: 20, bottom: 40, left: 60};
      const chartWidth = 800 - margin.left - margin.right;
      const chartHeight = 300 - margin.top - margin.bottom;

      const xScale = d3n.d3.scaleLinear()
        .domain([0, 255])
        .range([0, chartWidth]);

      const yScale = d3n.d3.scaleLinear()
        .domain([0, d3n.d3.max(histogram)])
        .range([chartHeight, 0]);
```

```

const xAxis = d3n.d3.axisBottom(xScale);
const yAxis = d3n.d3.axisLeft(yScale);

svg.append('g')
  .attr('transform', `translate(${margin.left},
${chartHeight + margin.top})`)
  .call(xAxis);

svg.append('g')
  .attr('transform', `translate(${margin.left},
${margin.top})`)
  .call(yAxis);

svg.append('text')
  .attr('transform', `translate(${chartWidth / 2},
${chartHeight + margin.top + 30})`)
  .style('text-anchor', 'middle')
  .text('Brightness');

svg.append('text')
  .attr('transform', 'rotate(-90)')
  .attr('y', margin.left - 5)
  .attr('x', 0 - (chartHeight / 2))
  .attr('dy', '1em')
  .style('text-anchor', 'middle')
  .text('Frequency');

svg.append('text')
  .attr('transform', `translate(${chartWidth / 2},
${chartHeight + margin.top + 70})`)
  .attr('text-anchor', 'middle')
  .style('fill', 'black')
  .style('font-size', '14px')
  .text(`Number of Pixels: ${numPixels}`);

svg.selectAll('rect')
  .data(histogram)
  .enter()
  .append('rect')
  .attr('x', (d, i) => xScale(i) + margin.left)
  .attr('y', d => yScale(d) + margin.top)
  .attr('width', 2)
  .attr('height', d => chartHeight - yScale(d))
  .attr('fill', 'steelblue');

sharp(Buffer.from(d3n.svgString()))
  .png()
  .toFile(`./output/${filePath.split('/').pop().split('.')[0]}-histogram.png`, (err) => {
    if (err) {
      console.error(err);
    }
  });

```

```

        return;
    }
    console.log('Histogram image saved');
  });
});
}

module.exports = getBrightnessHistogram;

```

2) Файл index.js

```

const readline = require('readline');
const getBrightnessHistogram = require('./get-brightness')

const rl = readline.createInterface({
  input: process.stdin,
  output: process.stdout
});

function main() {
  rl.question('Input the absolute path to the image: ', (filePath) => {
    getBrightnessHistogram(filePath);
    rl.close();
  })
}
main();

```

E.2 Код комп'ютерної програми «PASSENGER COUNTING VIA IP CAMS»

1) Python-скрипт підключення до IP-камери та зберігання результатів в БД

```
# Вказівка шляху до файлу ключа служби
os.environ["GOOGLE_APPLICATION_CREDENTIALS"] = "key.json"
# Ім'я колекції
collection_name = 'cameras'
storage_client = storage.Client()
db = firestore.Client()
exec_path = os.getcwd()
driver_path = path/to/chromedriver.exe'
# Створюємо об'єкт ChromeOptions
chrome_options = webdriver.ChromeOptions()
# Додаємо опцію для ігнорування помилок SSL
chrome_options.add_argument('--ignore-certificate-errors')
# Вимикаємо автоматичне оновлення сторінки під час завантаження
chrome_options.add_argument('--disable-prompt-on-repost')
# chrome_options.add_argument('--headless')
# Створюємо об'єкт ChromeService
chrome_service = webdriver.chrome.service.Service(driver_path)
# Створюємо екземпляр драйвера
driver = webdriver.Chrome(service=chrome_service, options=chrome_options)
counter = 1
def upload_image_to_storage(file_path):
    """Завантаження зображення в Firebase Storage та отримання його
    URL."""
    bucket_name = "smartcity-a7289.appspot.com"
    # Отримання імені файлу зі шляху
    file_name = os.path.basename(file_path)
    # Завантаження файлу в бакет
    blob = storage_client.bucket(bucket_name).blob(file_name)
    blob.upload_from_filename(file_path)
    # Отримання URL зображення
    expiration = datetime.now() + timedelta(days=365)
    image_url = blob.generate_signed_url(expiration)
    print(image_url)
    return image_url
def update_document_with_image(collection_name, document_id, image_url,
count):
    """Додати зображення до поля photos документа в Firestore."""
    try:
        # Посилання на документ
        doc_ref = db.collection(collection_name).document(document_id)
        # Створення об'єкта зображення
        image_data = {
            'id': datetime.now().strftime("%Y%m%d%H%M%S%f"),
            'url': image_url,
            'count': count,
```

```

        'createdAt': datetime.now()
    }
    # Отримання поточного стану поля photos
    doc = doc_ref.get()
    photos = doc.to_dict().get('photos', [])
    # Додавання нового об'єкта зображення до масиву
    photos.append(image_data)
    # Оновлення документа
    doc_ref.update({'photos': photos})
    print(f'Зображення успішно додано до документа {document_id} у
колекції {collection_name}.')
except Exception as e:
    print(f'Помилка при додаванні зображення до документа: {e}')
try:
    url = ""
    driver.get(url)
    time.sleep(10)
    while True:
        current_time = datetime.now().strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
        filename = f'screenshot_{current_time}_{counter}.png'
        driver.save_screenshot(filename)
        print(f'print #{counter}')
        detection = ObjectDetection()
        detection.setModelTypeAsRetinaNet()
        detection.setModelPath(os.path.join(exec_path,
"retinanet_resnet50_fpn_coco-eeacb38b.pth"))
        detection.loadModel()
        custom = detection.CustomObjects(person=True)
        list = detection.detectObjectsFromImage(
            custom_objects=custom,
            display_object_name=False,
            display_percentage_probability=False,
            input_image=(os.path.join(exec_path, filename)),
            output_image_path=(os.path.join(exec_path, "output_ai.jpg")))
        people_count = len(list)
        # Шлях до файлу зображення
        image_path = "output_ai.jpg"
        image_url = upload_image_to_storage(image_path)
        update_document_with_image(collection_name, "1", image_url,
people_count)
        counter += 1
        time.sleep(15)
finally:
    driver.quit()

```

2) JavaScript-код дашборду (вебінтерфейсу), який надає користувачеві доступ до даних БД

```
import Vue from 'vue'
import App from './App.vue'
import vuetify from './plugins/vuetify'
import router from '@routes/router';
import VueRouter from 'vue-router';
Vue.config.productionTip = false
Vue.use(VueRouter);
new Vue({
  vuetify,
  router,
  render: h => h(App)
}).$mount('#app')
<script>
import PieChart from "@components/Chart/PieChart.vue";
import DoughnutChart from "@components/Chart/DoughnutChart.vue";
import CameraModel from "@components/modal/CameraModel.vue";
import firebase from '../..fb.js';
export default {
  name: "HomePage",
  components: {CameraModel, DoughnutChart, PieChart},
  data () {
    return {
      loadingTable: true,
      showModal: false,
      districtsCamerasCount: {
        Zavodskoy: 0,
        Central: 0,
        Ingulsky: 0,
        Korabelny: 0
      },
      cameraId: null,
      search: '',
      headers: [
        {
          text: 'Id',
          align: 'start',
          sortable: false,
          value: 'id',
        },
        { text: 'Model', value: 'model', sortable: false },
        { text: 'Address', value: 'address', sortable: false },
        { text: 'Status', value: 'status', sortable: false },
      ],
      cameras: [
    ],
  }
},
created() {
  const db = firebase.firestore();
```

```

const camerasCollection = db.collection('cameras');
this.loadingTable = true
camerasCollection.get().then((querySnapshot) => {
  querySnapshot.forEach((doc) => {
    this.cameras.push(doc.data());
    this.cameras.forEach(camera => {
      switch (camera.district) {
        case 0:
          this.districtsCamerasCount.Zavodskoy++;
          break;
        case 1:
          this.districtsCamerasCount.Central++;
          break;
        case 2:
          this.districtsCamerasCount.Ingulsky++;
          break;
        case 3:
          this.districtsCamerasCount.Korabelny++;
          break;
        default:
          break;
      }
    });
    this.loadingTable = false
    console.log('CAMERA', this.cameras)
  });
}).catch((error) => {
  console.log("Помилка при отриманні даних:", error);
});
},
computed: {
  countCamerasIsOnline() {
    return this.cameras.filter(e => e.status).length
  },
  countCamerasIsOffline() {
    return this.cameras.filter(e => !e.status).length
  }
},
methods: {
  openModal(camera) {
    this.cameraId = camera.id
    this.showModal = true
  },
  closeModal() {
    this.showModal = false
  }
}
}
</script

```