

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧОРНОМОРСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЖУРАВСЬКА ІРИНА МИКОЛАЇВНА

УДК 004.77:629.734/.735

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ, МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ СТВОРЕННЯ ТА
ФУНКЦІОНУВАННЯ ШВИДКОДИНАМІЧНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ
КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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



І. М. Журавська

Науковий консультант:

Мусієнко Максим Павлович,

доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Журавська І. М. Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти». – Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв, 2019.

Дисертація спрямована на вирішення актуальної науково-технічної проблеми розроблення наукових і технічних основ побудови і практичного використання сучасних швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж (ШГКМ) критичного застосування.

Такі автономні системи (як поодинокі, так і караванного типу) вже використовуються та плануються до впровадження у різних галузях господарства – вантажних перевезеннях морським та автотранспортом, моніторингових та рятувальних операціях.

Поширюється у світі створення цілих «флотів» з над-/підводних («караванів» з наземних або «зграй» з літальних) безпілотних апаратів (БПА) – інакше дронів, роботів або боїдів, птахоподібних об'єктів – для військових потреб. Найбільшого поширення набули БПА, що пересуваються у повітряному середовищі, тобто безпілотні літальні апарати (БПЛА).

В той же час оборонно-промисловий комплекс Росії та Великобританії активно займається розробленням засобів радіоелектронної боротьби та електронної війни на основі нейромережових алгоритмів. Такі засоби радіоелектронної боротьби спроможні порушити обмін даними та управління БПЛА й заблокувати дії рою.

В таких умовах актуальним є вирішення проблеми автономної поведінки БПЛА з дотриманням вимог щодо конфіденційності інформації про їх місцезнаходження.

Існує достатньо велика теоретична та методологічна база досліджень керованих та автономних інформаційно-вимірювальних систем та компонентів у наукових працях провідних вітчизняних та закордонних вчених, але більшість запропонованих рішень мають обмеження щодо обсягу інформації, обробленої та передаваної в одиницю часу. Таким чином, недостатньо дослідженими залишаються рухомі комп'ютерні мережі з ознаками швидкодинамічності – тобто, з навігацією рухомого об'єкта за картою на швидкості вище 3 м/с з передачею відеотрафіка вище 7 кадрів/с та з іншими характеристиками, що вимагають обробки та прийняття рішень у стислий час.

Крім того, швидкий розвиток конкурентоспроможних рішень на ринку комп'ютерних компонентів для БПЛА зумовив відсутність актуальних досліджень в напрямку співвідношення зростаючого їх енергоспоживання та часу працездатності батарей для живлення безпілотних апаратів. Гетерогенність електронно-обчислювального обладнання на борту БПЛА і каналів зв'язку між ними та з командним центром (КЦ) на теперішній час не врахована у повній мірі при визначенні часу життя ШГКМ. Особливої важливості ця проблематика набуває в задачах критичного застосування зграй БПЛА при моніторингу аварійних станів промислових об'єктів та в рятувальних операціях над територією певної площі.

У першому розділі проведений аналіз сучасного стану та шляхів удосконалення методів створення та функціонування гетерогенних комп'ютерних мереж на основі БПА. Розроблено узагальнену класифікацію структур мережевої взаємодії об'єктів таких комп'ютерних систем за ознаками гетерогенності, швидкодинамічності, критичності застосування, централізованості управління з КЦ, розбиття на суб-рої, наявності головних («лідуючих») БПЛА та характеристик їх апаратних компонентів.

Розкрито переваги використання централізованого управління всією групою пристроїв при невеликій кількості БПЛА. При збільшенні кількості БПЛА у групі зростає навантаження на канал зв'язку між КЦ та кожним БПЛА. Тому подальшим розвитком є побудування ШГКМ з розробленням методів

ройового управління зграєю БПЛА, розподіленою на суб-рої. Обґрунтовано, що найбільш перспективним є розроблення методів та алгоритмів перевизначення задач та планування маршрутів БПЛА з урахуванням швидкодинамічних властивостей рухомих моніторингових мереж (РММ).

У другому розділі вперше запропонований метод визначення зменшення часу життя КФО за рахунок обчислення реального часу витрати повного заряду акумуляторів БПЛА на основі обчислення сумарної траєкторії руху з урахуванням відхилень через зовнішні збурення, що надає можливість своєчасно знімати дрони з маршруту та відправляти на базу для підзарядки батарей.

Удосконалено метод моделювання траєкторії руху роботизованих систем на основі стохастичних диференціальних рівнянь Ланжевена за рахунок застосування теоретичних засад «прогулянок Ліві» та «польотів Ліві», що дозволило прогнозувати поведінку групи (зграї, рою) БПЛА з урахуванням у траєкторії зовнішніх збурень на подібну броунівського руху, а також перешкоди руху. Вперше для визначення траєкторії БПЛА застосована фінансова модель Блека-Шоулза, яка дозволила сформулювати точне рішення рівняння Ланжевена для роботизованих систем. Чисельне рішення отримане в пакеті MATLAB за допомогою метода Ейлера-Маруями, найменш вимогливого до обчислювальних ресурсів комп'ютерних систем. Показано, що середній відсоток похибки такої моделі складає 8,2 %, тому запропоновану вдосконалену модель доцільно застосовувати до прогнозування траєкторії руху БПЛА.

У третьому розділі розроблений метод визначення площі функціонування зграї БПЛА на основі прямокутника Брахмагупти з урахуванням зміни топології РММ на основі зграї БПЛА. Його використання дозволяє підвищити точність визначення необстеженої площі на 15,1 % завдяки урахуванню більшої скупченості зграї ніж прямокутник Брахмагупти через необхідність забезпечення надійного обміну даними між БПЛА.

Здійснена модифікація методу розбиття гетерогенної комп'ютерної системи БПЛА на суб-рої з вирішенням задачі комівояжера для кожного суб-рою окремо в обмежених просторових коридорах за рахунок реалізації алгоритмів

плаского повороту на основі алгоритму Браччіні, що дозволило спростити планування руху зграї до 2D-рішень для суб-роїв з наступною конкатенацією у спільне 3D-рішення та тим самим дозволило на 11,6 % прискорити обстеження території суб-роєм з 6 БПЛА.

Вперше розроблений метод синтезу суб-оптимальних маршрутів суб-роїв БПЛА на базі нейронної мережі Хопфілда за рахунок використання бінарної моделі польотної карти, що дозволило виключити дублювання виконання завдання у будь-яких точках території та надало можливість реалізувати механізм «самозагоєння» рою у межах зграї БПЛА за рахунок перевизначення завдань підгруп як кібер-фізичної системи (КФС) у разі втрати кількох БПЛА під час критичного застосування.

У четвертому розділі набув подальшого розвитку метод гарантованої доставки інформації між КФО за рахунок використання трансферних вузлів та хмарних сервісів (нп., Google FireBase), що дозволяє при втраті зв'язку відстрочити синхронізацію КФО до його поновлення та суттєво підвищує безпеку поточної інформації щодо функціонування БПЛА у разі перехоплення Об'єкта сторонніми особами.

Удосконалено метод підвищення криптостійкості передаваних повідомлень шляхом стеганографічного закриття GPS-координат БПЛА у відкриті дані, які передаються за допомогою протоколу MAVLink відкритими каналами зв'язку, що дозволяє при перехопленні трафіка скрити у переданій інформації дані щодо місцеположення БПЛА.

У п'ятому розділі набула подальшого розвитку математична модель диспетчеризації завдань обчислювачів об'єктів ШГКМ з вивільненням окремого ядра CPU для процесів управління, що дозволило зменшити енергоспоживання БПЛА на 15,7 % без суттєвого перегріву процесора у порівнянні з диспетчеризацією за стандартним планувальником завдань операційної системи. Розроблений алгоритм оптимального навантаження технологічними завданнями ядер однокристального процесора обчислювальної плати (CPU та/або GPU) на кібер-об'єкті зі зменшенням коефіцієнта навантаженості CPU на 23 %.

Вперше запропоновано метод усунення дублювання виконання технологічних функцій БПЛА за рахунок розроблених засобів управління режимами роботи неперіоритетних пристроїв, що дозволяє зменшити енергозатрати обладнанням на борту БПЛА на 11,2 %.

Набув подальшого розвитку метод бездротового передавання енергії між КФО на основі технології PoWiFi за рахунок розробленої циклограми з чергуванням інтервалів передачі даних та передавання енергії, що дозволяє здійснити підзарядку акумуляторів БПЛА без повернення на базу. Використання різних груп WiFi-каналів, що не перетинаються, згідно з правилами доменів FCC та ETSI, дозволяє запобігти інтерференції каналів, на яких передаються дані та енергетичні фрейми.

У шостому розділі наведені приклади практичного застосування розроблених у дисертаційній роботі теоретичних основ, методів та засобів створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування. Розроблена структура ШГКМ для обліку великорозмірних вантажів. Створена комп'ютерна система інформування капітана контейнеровоза про кількість контейнерів, що перенесені через борт судна портокраном. Для функціонування запропонованої ШГКМ не потрібне підключення до комп'ютерної мережі порту та до Інтернету.

Проведено експериментальні дослідження розробленої інформаційно-вимірювальної комп'ютерної системи на основі РММ з БПЛА для потреб міського житлово-комунального господарства щодо виявлення місць енерговитрат на міський підземній тепловій магістралі через аварію труб. Проведені дослідження підтвердили достатню точність результатів для позиціонування ремонтного обладнання точно над місцем пориву теплотраси. Показана перспективність подальшого застосування ШГКМ на базі БПЛА для виявлення місць втрат теплової енергії на підземних та висотних інженерних спорудах.

Розроблені структурні та конструктивні рішення БПЛА, в яких при критичному застосуванні передбачене катапультивання модулів з блоками

пам'яті задля непопадання до конкурентних осіб з оповіщенням командного центру про координати падіння.

Розроблені конструктивні рішення перспективних моделей БПЛА з подовженим життєвим циклом за рахунок більш економного витрачання заряду акумуляторів під час формування підйомної сили БПЛА.

У висновках наведено опис основних результатів дисертаційного дослідження.

Додатки містять технічні характеристики використаних систем та компонентів, лістинги програмних кодів для організації взаємодії об'єктів ШГКМ на апаратному рівні, авторську програму та результати комп'ютерного моделювання у середовищі МАТЛАБ траєкторії руху БПЛА, акти впровадження результатів дисертаційного дослідження, а також сертифікати участі у Міжнародних програмах, список праць за темою дисертації.

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено на контейнеровозі «CSCL Uranus» (зареєстрований у Hong Kong); у відділі з експлуатації житлового господарства департаменту житлово-комунального господарства (ЖКГ) Миколаївської міської ради, на комерційних підприємствах м. Миколаєва; при виконанні науково-дослідних робіт, які виконувались в Інституті імпульсних процесів та технологій НАН України та у Чорноморського національного університету (ЧНУ) ім. Петра Могили; у навчальному процесі ЧНУ ім. Петра Могили.

За результатами досліджень опубліковано 82 наукових праці, у т. ч.: 2 монографії, 23 статті, 43 тези доповідей на 38 Міжнародних та Всеукраїнських конференціях, 7 деклараційних патентів України на корисні моделі.

Ключові слова: кіберфізична система, швидкодинамічна гетерогенна комп'ютерна мережа, безпілотний літальний апарат, довжина траєкторії, рівняння Ланжевена, прогулянка Ліві, суб-оптимальний маршрут, нейронна мережа Хопфілда, стежоконтейнер, навантаженість ядер процесора.

SUMMARY

Zhuravska I. M. Theoretical bases, methods and means of creation and functioning of fast-dynamic heterogeneous computer networks for critical application. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for a Doctor of Technical Sciences degree in specialty 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, 2019.

The dissertation research is devoted to solving the actual scientific and technical problem of developing theoretical foundations of construction and practical use of modern fast-dynamic heterogeneous computer networks (FHCNs) for critical application.

The first chapter contains the review and analysis of the current state and ways for improving the methods of creating and functioning FHCNs based on unmanned vehicles have been implemented. It is shown that the most widespread unmanned vehicles are drones, operating in the air environment, i.e. unmanned aerial vehicles (UAVs). That is why UAVs are considered in the work as the main objects of FHCNs. It's made up the generalized classification of the structures of network interaction between the objects of such a computer system on the basis of heterogeneity, fast-dynamism, the criticality of application, centralized control by Control Centre (CC), subdivisions, presence of major ("leading") UAVs and characteristics of their hardware components.

The advantages of using the centralized control of the whole group of devices with a small number of UAVs are revealed. As the number of UAVs in the group increases, the load on the communication channel between the CC and each UAV. So, continued use is the construction of FHCNs with the development of methods to swarm control the UAV flock divided into sub-swarms. It is substantiated that the most promising is the development of methods and algorithms for a redefinition of UAV tasks and the planning of UAV routes, taking into account the fast-dynamic properties of mobile monitoring networks (MMN).

In the second chapter for the first time the method for determining the reduction in the CFO's life due to calculating the real-time consumption of the full charge of the UAV batteries. The method is based on the calculation of the total trajectory excepting the external perturbations. This made it possible timely removal of drones from the route and sending them to the base for recharging the batteries.

The method of modeling the trajectory of robotic systems motion based on Langevin stochastic differential equations is improved in this work. It allows providing an opportunity to predict the behavior of a group (flock, swarm) of unmanned vehicles (with a focus on unmanned aerial vehicles – UAV) taking into account external perturbations analogical to the Brownian motion. For the first time, to determine the UAV trajectory, the Black-Scholes financial model was used. It was formulated the exact solution of the Langevin equation for robotic systems. A numerical solution is obtained in the MATLAB package using the Euler-Maruyama method (EMM). The EMM is least demanding of computing resources of computer systems. It is shown that the average error rate of this model is 8.2%. Therefore, it is advisable to apply the proposed model to the forecasting of the trajectory of the UAV movement. The method of determining the total trajectory of the UAV movement using the theoretical principles of "Lévy walks" and "Lévy flights" for biological systems has been developed. Such an approach has made possible to determine the real-time of full charge consumption of UAV batteries, after which the drone should be removed from the route and sent to recharge. This approach can prevent critical application and even loss of drones due to the untimely return of them to the base for recharging.

A graph-analytical way of writing the mathematical models of the trajectory of the UAV movement is developed, which is more in line with the schematic structures, where the functions are depicted as logical elements on which the computer components are based. The high degree of algorithmizing of the proposed graph-analytic functional structures allows the step-by-step reproduction of the above structures on a high-level language in an interactive environment for programming, numerical calculations, and visualization of calculations.

In chapter three an improved method based on the Brahmagupta's quadrilateral for determining the UAV flock function area. This method takes into account the change in the flock topology and reduces the error by 15.1% because the flock topology is more crowded than the Brahmagupta's quadrilateral to provide more reliable data exchange between the UAVs.

The method of dividing a heterogeneous computer system based on UAVs to sub-swarms has improved. This method provides for the possibility the solution of the salesman problem (TSP) for each sub-swarm separately in the limited spatial corridors with the concatenation of 2D-solutions of TSP into the common solution.

The method of synthesis of sub-optimal routes of UAV sub-swarms with the help of the Hopfield neural network has proposed. The implementation of the self-healing mechanism within a flock of poultry-like objects ("boids") was also considered. The redefinition of tasks of subgroups as a cyber-physical system (CFS) in the event of loss of several boids during the critical application was also considered. It has allowed accelerating the inspection of the territory by sub-swarms consisting of six UAVs by 11.6%.

In the fourth chapter the method for preventing a drop in the rate of information transmission speed in a heterogeneous network due to obstacles to connecting to the ether of new cyber-physical objects (CPOs) – which are not part of the CPS but within the range of the latter – was improved. While the radius of the network with a stable connection is increased by 35.7% simultaneously due to the reduction of the channel asymmetry.

The method of guaranteed delivery of information between CPOs through the use of transfer nodes and cloud services (on the example of Google FireBase) is improved. As a direct result of this, the security of the transmitting data about UAV flock location significantly in case of interception of the object by third parties.

Improved steganographic method for increasing the cryptosecurity of transmitted messages by steganographic closure of the GPS coordinates of the UAV into open data transmitted using the MAVLink protocol by open communication channels.

In the fifth chapter an improved mathematical model for dispatching the tasks of the calculators of objects with limited energy resources, which allowed to develop an algorithm for optimal loading of technological tasks of single-chip processor CPU and/or GPU cores on a cyber object with a decreased in the CPU load factor by 23% and respectively the energy consumption of the MMN object by 15.7% for the quad-core processors, being used on modern UAV models.

The method of elimination the duplication of UAV technological functions via remotely disabling non-priority devices and/or damaged function modules onboard the UAV within a single subnet is developed. It has allowed to save up to 11.2% of the battery life of the UAV.

A wireless method of transmission of energy between CPOs based on PoWiFi technology has been further developed according to the cyclorama, which provides alternation of data and energy intervals, using different groups of non-intersecting Wi-Fi channels. according to the rules of the AFS domains and ETSI. This makes it possible the process of additional charge-up of UAV accumulators without returning them to base.

The sixth chapter gives examples of the practical application of the theoretical bases, methods, and means of creation and functioning of FHCNs for critical application developed in the dissertation. The structure of FHCN for an accounting of large-size cargoes has been developed. A computerized system for informing a container ship captain about the number of containers carried across the ship by a port crane has created. The operation of the proposed FHCN does not require connection to the port computer network and the Internet.

Experimental researches of the developed information-measuring computer system based on MMN with UAVs for the needs of urban housing and communal services to detection the places of heat energy losses on the urban underground thermal pipelines. The conducted studies have confirmed sufficient accuracy of the results for the positioning of the repair equipment just above the site of the heat main rupture. The prospect of further using the FHCNs with UAVs for detecting heat loss locations in underground and high-rise engineering structures is shown.

Structural solutions of small UAVs have been developed, that providing to catapult the modules with memory blocks in order not to reach competitors and to notify the command center about the coordinates of the fall in a critical application.

Constructive solutions of perspective UAV models with extended life cycle due to more economical consumption of battery charge during the formation of UAV wing- lift are developed.

The conclusions describe the main results of the dissertation research.

The appendices contain technical characteristics of used systems and components, listings of software codes for hardware-level interaction between FHCN objects, the author's program and the results of computer simulation in the MATLAB mathematical program of the UAV motion trajectory, acts of implementation of the dissertation research results, certificates of participation in the International programs, list of the published works on the theme of dissertation research.

Theoretical and practical results of the dissertation has used and implemented on the container ship “CSCL Uranus” (registered in Hong Kong), by the structural division of housing maintenance of the Department of Housing and Communal Services of the Mykolaiv City Council, at the commercial enterprises of Mykolaiv; in carrying out research works performed at the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine and at the Petro Mohyla Black Sea National University; in the educational process of the Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv).

According to the results of research, 82 scientific works have published, including 2 monographs, 23 articles, 43 abstracts at 38 International and all-Ukrainian conferences, 7 declarative patents of Ukraine for utility models.

Keywords: cyber-physical system, fast-dynamic heterogeneous computer network, UAV, trajectory length, Langevin equation, Lévy flight, sub-optimal route, Hopfield neural network, stegocontainer, CPU cores' heavy.

СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Zhuravska I., Musiyenko M. Heterogeneous computer networks of critical application: Creation and functioning of networks based on UAVs' swarms and flocks : monograph. LAMBERT Academic Publishing, 2018. 367 p. ISBN 978-613-9-86357-0.

2. Журавська І. М. Гетерогенні комп'ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БПЛА. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2019. 192 с. ISBN 978-966-336-402-5.

3. Zhuravska I., Kulakovska I., Musiyenko M. Development of a method for determining the area of operation of unmanned vehicles formation by using the graph theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2, No. 3 (92). P. 4–12. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.128745. **Scopus, Index Copernicus.**

4. Burlachenko I., Zhuravska I., Musiyenko M. Devising a method for the active coordination of video cameras in optical navigation based on multi-agent approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1, No. 9 (85). P. 17–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.90863. **Scopus, Index Copernicus.**

5. 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 – International Society for Optics and Photonics, Wilga, Poland, May 28-June 06, 2017*. Vol. 10445. UNSP 1044527. P. 1–13. ISSN 0277-786X. DOI: 10.1117/12.2280965. **Scopus, Web of Science.**

6. Zhuravska I., Lernasovych D., Burenko O. Detection the places of the heat energy leak on the underground thermal pipelines using the computer system. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2019. Vol. 4, No. 3, pp. 01–09. DOI: 10.25046/aj040301. **Scopus.**

7. Журавська І. М., Мусієнко М. П. Синтез маршрутів суб-роїв безпілотних апаратів з використанням нейронної мережі Хопфілда для обстеження територій. *Radio Electronics, Computer Science, Control / Zaporizhzhya National Technical University*. 2017. No. 3. P. 86–94. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-3-10. **Web of Science**.

8. Журавська І. М. IoT-мережа на базі Bluetooth-модулів для автоматизованого керування споживанням енергоресурсів. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво / Луцьк. нац. техн. ун-т*. 2018. Вип. 30–31. С. 37–44. **Index Copernicus**.

9. Zhuravska I., Borovlova S., Kostyria M., Koretska O. Efficiency improvement of using unmanned aerial vehicles by distribution of tasks between the cores of the computing processor. *Technology audit and production reserves*. 2017. Vol. 6, No. 6 (38). P. 4–13. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.117889. **Index Copernicus**.

10. Журавська І. М., Обухова К. О., Лавриненко С. В. Імплементация програмного забезпечення моніторингу та диспетчеризації навантаження ядер однокристального процесора. *Наукові праці : наук. журн. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили*. 2017. Т. 308. Вип. 296. С. 77–82 (Серія : Комп'ютерні технології). **Index Copernicus**.

11. Мусієнко М. П., Журавська І. М. Система контролю безпілотних апаратів, заснована на використанні мобільних пристроїв. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво / Луцьк. нац. техн. ун-т*. 2017. Вип. 26. С. 199–203. **Index Copernicus**.

12. Журавська І. М., Савінов В. Ю., Корецька О. О., Буренко В. О. Розподілення навантаження між багатоядерними обчислювачами для задач енергонезалежних інформаційно-вимірjувальних 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). **Index Copernicus**.

13. Журавська І. М. Забезпечення стабільного бездротового зв'язку у кіберфізичній системі з рухомими об'єктами. *Технологічний аудит та резерви*

виробництва : наук. журн. Харків : Технологічний центр, 2016. Т. 5, № 5/2(31). С. 58–64. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.80784. **Index Copernicus**.

14. Журавська І. М. Аналіз та вибір WiFi-мережі в умовах нестабільної ефірної ситуації. *Технологічний аудит та резерви виробництва* : наук. журн. Харків : Технологічний центр, 2013. Т. 5, № 5 (13). С. 8–10. DOI: 10.15587/2312-8372.2013.18371. **Index Copernicus**.

15. Журавська І. М. Бездротовий метод керування відключенням пристроїв на борту БПЛА з обмеженими енергоресурсами. *Електротехнічні та комп'ютерні системи* / Одес. нац. політехн. ун-т. 2018. № 27 (103). С. 205–212. DOI: 10.15276/eltecs.27.103.2018.23. **Index Copernicus**.

16. Журавська І. М. Генерація суб-оптимальних маршрутів безпілотного літального апарата з використанням нейронної мережі Хопфілда. *Проблеми інформаційних технологій* : наук.-метод. журн. / Херсон. нац. техн. ун-т. 2018. Вип. 01 (023). С. 181–185.

17. Журавська І. М. Реєстрація великорозмірних вантажів за допомогою автоматизованої системи на базі пристроїв з обмеженими обчислювальними можливостями. *Електротехнічні та комп'ютерні системи* / Одес. нац. політехн. ун-т. 2017. № 26 (102). С. 60–67. DOI: 10.15276/eltecs.26.102.2017.7.

18. Журавська І. М., Мусієнко М. П. Мобільна система керування гетерогенною рухомою мережею безпілотних апаратів. *Зб. наук. праць Військ. ін-ту Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка*. Київ : ВІКНУ, 2017. Вип. № 57. С. 30–40.

19. Журавська І. М., Мусієнко М. П., Кулаковська І. В. Автоматизована система обліку розвантаження суден контейнеровозів з використанням мобільних пристроїв. *Наук. вісник Херсон. держ. мор. акад.* : наук. журн. 2017. Вип. 1 (16). С. 37–46.

20. Журавська І. М., Мусієнко М. П., Румянков Д. І. Блоковий метод шифрування для рухомих об'єктів з обмеженими обчислювальними ресурсами. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія* / Вінниц. нац. політехн. ун-т. 2016. Т. 3, № 37. С. 28–32.

21. Мусієнко М. П., Журавська І. М. Алгоритми прокладання маршруту безпілотних літальних апаратів на основі застосування нейронних мереж Хопфілда. *Вісник Черкаського держ. технол. ун-ту* : зб. наук. праць. 2016. № 1. С. 20–27 (Серія : Технічні науки).

22. Мусієнко М. П., Журавська І. М., Бурлаченко І. С. та ін. Рухомі моніторингові мережі критичного застосування: проблеми створення та напрями розвитку. *Наукові праці* : наук.-метод. журн. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. 2015. Т. 266, Вип. 254. С. 112–118 (Серія : Комп'ютерні технології).

23. Фісун М. Т., Журавська І. М., Горбань Г. В. Інтеграція даних мережевого трафіку мультісервісної корпоративної мережі з класами постріляційної СКБД Caché. *Наукові праці* : наук.-метод. журн. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. 2011. Т. 173, Вип. 161. С. 105–110 (Серія : Комп'ютерні технології).

24. Журавская И. Н., Назарова Н. С. Определение эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции двухобмоточного трансформатора. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий* : сб. науч. тр. / ИИПТ НАН Украины. Николаев ; отв. ред. В. С. Крутиков. Николаев : Атолл, 2002. Вып. 4. С. 115–122.

25. Мирошниченко Л. Н., Пусев А. Н., Журавская И. Н. Эффективное управление многоячеечными зарядными устройствами на базе однотоковых транзисторных инверторов. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий* : сб. науч. тр. / Отв. ред. В. В. Шамко. Киев : Наук. думка, 1995. Вып. 2. С. 107–110. ISSN 0132-1811.

26. Пат. на корисну модель 130608 Україна, МПК (2006.01) B64C 39/02. Малогабаритна безпілотна авіаційна система повітряного спостереження з наземної станції контролю та управління / Д. І. Румянков, М. П. Мусієнко, І. М. Журавська, В. В. Олійник. № u 2018 08713 ; заявл. 14.08.2018 ; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23.

27. Пат. на корисну модель 130607 Україна, МПК (2018.01) B64C 29/00. Спосіб формування підйомної сили безпілотних літальних апаратів з можливістю

осьового розвороту корпусу апаратів, що виконують процедуру підйому і переміщення предметів / І. М. Журавська. № u 2018 08712 ; заявл. 14.08.2018 ; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23.

28. Пат. на корисну модель 130195 Україна, МПК (2006.01) B64C 29/04. Спосіб формування підйомної сили спарених безпілотних літальних апаратів для підйому і переміщення предметів / І. М. Журавська. № u201806480 ; заявл. 11.06.2018 ; опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

29. Zhuravska I., Musiyenko M., Tohoiev O. Development the heat leak detection method for hidden thermal objects by means the information-measuring computer system. *CEUR Workshop Proceedings : Proceedings of the 2nd International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)*, Zaporizhzhia, Ukraine, April 15-19, 2019 [eds.: D. Luengo, S. Subbotin, P. Arras, et al.], Vol. 2353. P. 350–364. ISSN 1613-0073. **Scopus**

30. Burlachenko I., Zhuravska I., Davydenko Ye., Savinov V. Vulnerabilities analysis and defense based on MAS method in fast dynamic wireless networks. *Wireless Systems within the IEEE International Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IEEE IDAACS-SWS 2018)*: Proceeding of the 4th IEEE International Symposium, Lviv, Ukraine, September 20–21, 2018. P. 98–102. ISBN 978-1-5386-7587-8. DOI: 10.1109/IDAACS-SWS.2018.8525692. **Scopus, Web of Science.**

31. Rumiankov D., Zhuravska I., Solobuto L., Musiyenko M. Reduction of noise similar to solar interference in computer networks based on Power Line Communication. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2017)*: Proceeding of the 8th IEEE International Conf., Bucharest, Romania, September 21–23, 2017. Vol. 1. P. 215–221. ISBN 978-1-5386-0697-1/17. DOI: 10.1109/IDAACS.2017.8095079. **Scopus, Web of Science.**

32. Musiyenko M. P., Burlachenko I. S., Denysov O. O., Zhuravska I. M. Development of double median filter for optical navigation problems. *Data Stream Mining & Processing (DSMP–2016)*. Proceeding of the IEEE 1st International Scientific and Technical Conf., Lviv (vil. Stare Selo), August 23–27, 2016 / Lviv Polytechnic National University. P. 177–181. ISBN 978-1-5090-3737-7, 978-1-5090-3736-0. DOI: 10.1109/DSMP.2016.7583535. **Scopus, Web of Science.**

33. Musiyenko M. P., Zhuravska I. M., Kulakovska I. V., Kulakovska A. V. Simulation the behavior of robot sub-swarm in spatial corridors. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO–2016)*: Proceeding of the 2016 IEEE 36th International Conf., Kyiv, Ukraine, April 19–21, 2016 / National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. P. 382–387. ISBN 978-1-5090-1431-6. DOI: 10.1109/ELNANO.2016.7493090. **Scopus, Web of Science.**

34. Zhuravska I. M., Popel M. I. Automation of pharmaceutical warehouse using groups robots with remote climate control and video surveillance. *Science and Innovation in the XXI century*: Collection of Conf. Papers of International Scientific-Practical Conf., London, the United Kingdom, December 11–12, 2014. P. 30–32. DOI: 10.5281/zenodo.14090. **Zenodo-CERN Data Centre.**

35. Zhuravska I. M., Lavrynenko S. V. Implementation the monitoring CPU loading application for mobile devices. *Information technology and interactions (IT&T–2017)*: Proceedings of the 4th International Scientific Conf.. Kyiv, Ukraine, November 8–10, 2017 / Taras Shevchenko National University of Kyiv. P. 112–113.

36. Kulakovska I. V., Zhuravska I. M. Mathematical modeling container network via a connected graph. *11th International Algebraic Conf. in Ukraine dedicated to the 75th anniversary of V. V. Kirichenko*: Abstracts, Kyiv, Ukraine, July 3–7, 2017 / Taras Shevchenko National University of Kyiv. P. 68. Also available from URL: <https://www.imath.kiev.ua/~algebra/iacu2017/abstracts> (Last accessed October 31, 2017).

37. Zhuravska I. M., Lematovych D. O. Fuzzy modeling system of human behavior and biometric identification using cloud services. *Applied Sciences in Europe: Tendencies of Contemporary Development* : Papers of the 5th International Scientific Conf., Stuttgart, Germany, March 24, 2014. P. 30–32. ISBN 978-3-944375-34-2.

38. Білий О. Р., Гапчук А. О., Журавська І. М. Побудування теплових карт для виявлення теплових втрат житлових та промислових споруд. *Free and Open Source Software (FOSS-2018)* : тези доп. X Міжнар. наук.-практ. конф. / Харків. нац. ун-т будівництва та архітектури, Харків, 20–22 листопада 2018 р. Харків : Вид во ХНУБА, 2018. С. 59.

39. Журавська І. М., Кулаковська І. В. Метод визначення площі функціонування групи безпілотних апаратів з використанням GPS-координат. *Ольвійський форум – 2018 : стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі* : тези XII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Миколаїв, 7–10 червня 2018 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2018. С. 60–62.

40. Журавська І. М., Мусієнко М. П. Мобільний реєстратор завантаження/розвантаження великорозмірних об'єктів військово-цивільного призначення. *Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє* : тези доп. XIII Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 24 листопада 2017 р. / Військ. ін-т Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Київ : ВІКНУ, 2017. С. 37–38.

41. Журавська І. М., Лавриненко С. В., Обухова К. О. Моніторинг навантаження обчислювальних систем БПЛА. *Free and Open Source Software (FOSS-2017)* : тези доп. IX Міжнар. наук.-практ. конф. / Харків. нац. ун-т будівництва та архітектури, Харків, 21–23 листопада 2017 р. Харків : Вид во ХНУБА, 2017. С. 72.

42. Боровльова С. Ю., Журавська І. М., Костиря М. А. Бенчмаркінг ефективності організації ітераційних процесів у багатоядерному процесорі. *Могілянські читання-2017. Секція «АСУ, CASE-засоби та програмна інженерія»* : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13-17 листопада 2017 р. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2017. С. 57–60.

43. Довгенко О. Є., Журавська І. М. Моделі та методи розробки інформаційно-вимірювальних систем моніторингу температурного режиму побутових споруд. *Могилянські читання-2017. Секція «Комп'ютерна інженерія»* : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13-17 листопада 2017 р. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2017. С. 31–32.

44. Єлезаров В. О., Журавська І. М. Технологія Інтернету речей для забезпечення почергового підключення побутової техніки до електромережі. *Могилянські читання-2017. Секція «Комп'ютерна інженерія»* : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13–17 листопада 2017 р. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2017. С. 32–34.

45. Журавська І. М., Залюбовський М. В., Мільошин А. С. Автоматизована система обліку великих вантажів з реєстраторами на базі мобільних пристроїв. *Могилянські читання-2017. Секція «Комп'ютерна інженерія»* : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13-17 листопада 2017 р. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2017. С. 35–37.

46. Журавська І. М., Савінов В. Ю., Лавриненко С. В., Обухова К. О. Імплементация програмного забезпечення моніторингу та диспетчеризації навантаження ядер процесору рухомого пристрою. *Могилянські читання-2017. Секція «Методи, моделі та інформаційні технології»* : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф. Миколаїв, 13–17 листопада 2017 р. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2017. С. 112–115.

47. Журавська І. М. Використання трансферних вузлів рухомих мереж для атаки на комп'ютерні системи наземних абонентів мережі. *Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації* : тези доп. VI Міжнар. наук.-практ. конф., Вінниця, 24–25 жовтня 2017 р. Вінниця : Вид-во Вінниц. нац. техн. ун-ту, 2017. С. 58–60.

48. Журавська І. М. Забезпечення функціонування суб-роїв безпілотних літальних апаратів за допомогою бортових датчиків. *Датчики, прилади та системи (ДПС – 2017)* : тези доп. VI Міжнар. наук.-техн. конф., Черкаси–

Миколаїв–Херсон–Лазурне, 18–22 вересня 2017 р. / Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : Видавець Третяков О., 2017. С. 27–32.

49. Жарук Д. О., Журавська І. М., Мусієнко М. П. Програмне забезпечення на базі хмарного сервісу Google Firebase для керування безпілотними апаратами. *Інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами* : зб. тез Міжнар. наук.-практ. конф., Луцьк, 28-29 квітня 2017 р. / Луцьк. нац. техн. ун-т. Луцьк : Вежа-Друк, 2017. С. 16.

50. Журавська І. М. Метод організації захищеного бездротового каналу з інтегрованим стежоконтейнером для моніторингової мережі відеокамер. *Інформаційна безпека та комп'ютерні технології (IS&CT 2017)* : зб. тез доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., Кропивницький, 20–22 квітня 2017 р. / Центральнoукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький : Вид-во ЦНТУ, 2017. С. 46-47.

51. Журавська І. М., Кулаковська І. В., Кулаковська А. В. Математичне моделювання мережі контейнеровозу за допомогою зв'язного графа. *Ольвійський форум-2017* : стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі : тези доп. XI Міжнар. наук.-практ. конф., Миколаїв – Коблево, 8–11 червня 2017 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2017. С. 51–54.

52. Журавська І. М., Кулаковська І. В., Мусієнко М. П. Автоматизація обліку розвантаження суден-контейнеровозів. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2017)* : тези доп. IX Міжнар. наук.-практ. конф., Херсон, 23–25 травня 2017 р. / Херсон. держ. мор. академія. Херсон : Вид-во ХДМА, 2017. С. 203–206.

53. Шуляков Д. В., Журавська І. М. Дослідження та побудова СППР для обробки, аналізу та зберігання даних для керування рухомою моніторинговою мережею. *Інтелектуальні інформаційні системи – 2016* : тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф., Миколаїв, 16–17 лютого 2016 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2016. С. 135–137.

54. Журавська І. М., Румянков Д. І. Система автоматичного керування на основі Arduino з мікроконтролером Atmega для прийняття рішень щодо керування польотом БПЛА. *Могілянські читання – 2016* : тези доп. XIX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 14–18 листопада 2016 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. Т. 5. С. 24–26.

55. Журавська І. М., Олійник В. В. Підсистема катапультивання та визначення GPS-координат блоків БПЛА при критичному застосуванні. *Могілянські читання – 2016* : тези доп. XIX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 14–18 листопада 2016 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2016. Т. 5. С. 83–84.

56. Журавська І., Корецька О., Мусієнко М. Розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення. *Інтернет – Освіта – Наука – 2016* : матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф., Вінниця, 11-14 жовтня 2016 р. / Вінниц. нац. політехн. ун-т та [ін.]. Вінниця : ВНТУ, 2016. С. 79–81.

57. Журавская И. Н. Система восстановления пароля доступа к сторонней WiFi-сети в чрезвычайных ситуациях. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист (НСБЗ'2016)* : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф., Черкаси, 21–22 жовтня 2016 р. / Держ. служба України з надзв. ситуацій, Черкас. ін-т пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля Нац. ун-ту цивільн. захисту України та [ін.]. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2016. С. 138–140.

58. Журавська І. М., Мусієнко М. П., Щебетюк В. О. Захист інформації щодо місцезнаходження БПЛА за допомогою стеганографічних рішень. *Інформація, комунікація, суспільство – 2016 (ICS – 2016)* : тези доп. V Міжнар. наук. конф., Львів – Славське, 19–21 травня 2016 р. / Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2016. С. 24–25.

59. Журавська І. М., Мусієнко М. П., Румянков Д. І. Підвищення ефективності шифрування керуючого трафіку БПЛА засобами модифікованого блокового методу. *Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення*

інформації: тези доп. V Міжнар. наук.-практ. конф., Вінниця, 19–21 квітня 2016 р. / Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця : Вид-во ВНТУ, 2016. С. 39–41.

60. Журавська І. М., Румянков Д. І. Корпоративний месенджер з шифруванням трафіку модифікованим блочним методом на базі операції XOR. *Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі (КІСМ – 2016)*: тези доп. IX Всеукр. наук.-практ. конф., Кривий Ріг, 22–24 березня 2016 р. / Криворіз. нац. ун-т. Кривий Ріг : Вид-во ДВНЗ «Криворіз. нац. ун-т», 2016. С. 135–137.

61. Журавська І. М., Барчинський М. В., Димедюк С. В., Програмна платформа мобільної системи керування рухомою моніторинговою мережею. *Інформаційні технології та взаємодії (IT&I – 2015)*: тези доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 3–5 листопада 2015 р. / Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. Київ : Вид.-поліграф. центр «Київ. ун-т», 2015. С. 85–87.

62. Бурлаченко І. С., Денисов О. О., Журавська І. М. Вибір апаратної платформи для проектування та реконфігурації рухомих об'єктів моніторингових мереж. *Могілянські читання – 2015*: тези доп. XVIII Всеукр. наук.-метод. конф. Миколаїв, 12–20 листопада 2015 р. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. Т. 1. С. 113–115.

63. Журавська І. М., Собко Д. А., Салтан Б. А. Аналіз захищеності Wi-Fi та механізми розбудови безпечної мережі. *Могілянські читання – 2015*: тези доп. XVIII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 12–20 листопада 2015 р. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. Т. 1. С. 79–81.

64. Мусієнко М. П., Журавська І. М., Юрін Д. В. Аналіз безпеки механізмів обміну даними між наземним пунктом керування та безпілотним літальним апаратом. *Інформаційні технології та взаємодії (IT&I – 2015)*: тези доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 3–5 листопада 2015 р. / Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. Київ : Вид.-поліграф. центр «Київ. ун-т», 2015. С. 47–48.

65. Журавська І. М., Поліщук Д. В. Аналіз загроз у публічних бездротових мережах та захисту користувацьких даних. *Могілянські читання – 2015* : тези доп. XVIII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 12-20 листопада 2015 р. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. Т. 1. С. 78–79.

66. Журавская И. Н., Щebetюк В. О. Создание стежоконтейнеров в телекоммуникации с БПЛА на основе Open Source протокола MAVLink. *Free and Open Source Software (FOSS-2015)* : тези доп. VII Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 24–27 листопада 2015 р., / Харк. нац. ун-ту будівництва та архітектури. Харків : Вид-во ХНУБА, 2015. С. 36.

67. Журавська І. М., Попель М. І. Автоматизація фармацевтичного складу з використанням спеціалізованих роботів, дистанційного клімат-контролю та відеоспостереження. *Могілянські читання – 2014* : тези доп. XVII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 17–21 листопада 2014 р. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. С. 63.

68. Журавська І. М., Богаченко Є. В., Вдовиченко А. В. Організація відеотрансляції прес-конференції з локальної комп'ютерної мережі на центральний канал телебачення з використанням технології VLAN. *Могілянські читання – 2014* : тези доп. XVII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 17–21 листопада 2014 р. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. С. 57-58.

69. Журавська І. М., Божаткін С. М. Забезпечення мережевої безпеки хмарних середовищ. *Інформаційні управляючі системи та технології (ІУСТ-ОДЕСА-2013)* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Секція 4 : Засоби і методи захисту інформаційних систем, Одеса, 8–10 жовтня 2013 р. / Одес. нац. морський ун-т ; відп. ред. В. В. Вичужанін. Одеса : Вид-во ОНМУ, 2013. С. 207–210. ISBN 978-966-7591-58-8.

70. Журавская И. Н., Божаткин С. М. Защита компьютерной сети применительно к облачным средам. *Сучасні проблеми інформаційної безпеки на транспорті* : тези доп. III Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю. Секція 2 :

Захист інформації в каналах зв'язку та глобальних мережах передачі даних, Миколаїв, 3-6 вересня 2013 р. / Нац. ун-т кораблебудування. Миколаїв : Вид-во НУК, 2013. С. 61-64. ISBN 978-966-321-265-4.

71. Фісун М. Т., Журавська І. М., Горбань Г. В. Використання OLAP-технології для аналізу мережевого трафіку засобами об'єктної СКБД. *Комп'ютерні системи та мережеві технології (CSNT'2012)* : тези доп. V Міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 13-15 червня 2012 р. / Нац. авіац. ун-т. Київ : Вид-во НАУ, 2012. С. 129.

72. Єр'омін Б. В., Журавська І. М. Відстеження поведінкових характеристик елементів динамічного веб-сайту за допомогою теплових карт. *Ольвійський форум – 2019 : стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі* : тези XIII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Миколаїв, 6-9 червня 2019 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2019. С. 83–84.

73. Журавська І. М., Божаткін С. М., Мосензов Є. О. Програмне забезпечення підбору параметрів та розробка абонентського обладнання доступу до WiFi-мережі. *Комп'ютерні системи та мережеві технології (CSNT'2010)* : тези доп. III Міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 15–17 червня 2010 р. / Нац. авіац. ун-т. Київ : Вид-во НАУ, 2010. С. 18.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.

74. Musiyenko M. P., Zhuravska I. M., Burlachenko I. S., Denysov O. O. The principles of the cyber-physical components' organization based on the methods of the multi-agent interaction of the moving objects. *Advances in Cyber-Physical Systems / Lviv Polytechnic National University*. 2016. Vol. 1, No. 1. P. 48–57.

75. Журавська І. М. Проектування та монтаж локальних комп'ютерних мереж : навч. посібник. Миколаїв : Видавництво ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. 396 с. ISBN 978-966-345-5.

76. Журавська І. М., Румянков Д. І. Створення модифікованого блокового методу шифрування на базі операції XOR для корпоративного месенджера. *Наукові праці / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Серія : Комп'ютерні технології : наук.-метод. журн. Миколаїв, 2015. Т. 266, Вип. 254. С. 97–104.*

77. Журавська І. М. Проектування комп'ютерних мереж. Ч. I : Локальні мережі : навч.-метод. посібник. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. 124 с. (Методична серія ; вип. 171).

78. Журавская И. Н. Современное состояние резонансных высоковольтных высокочастотных источников питания. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий : сб. науч. тр. / Отв. ред. В. В. Шамко. Киев : Наук. думка, 1995. Вып. 2. С. 110–113.*

79. Пат. на корисну модель 132326 Україна, МПК (2006) В64С 29/00. Спосіб формування підйомної сили безпілотного літального апарату для підйому і переміщення предметів у повітряному середовищі / І. М. Журавська. № u 2018 08711 ; заявл. 14.08.2018 ; опубл. 25.02.2019, Бюл. № 4.

80. Пат. на винахід 21356А Україна, МПК (2006.01) Н03К 17/61. Спосіб передачі уніполярних прямокутних імпульсів через гальванічно розв'язане коло та пристрій для його здійснення / Л. М. Мірошніченко, І. М. Журавська, О. М. Пусєв. № 93007773; заявл. 08.12.93 ; опубл. 30.04.98, Бюл. № 2.

81. Пат. на винахід 3031 Україна, МПК (2006.01) Н01L 23/34. Пристрій для охолодження напівпровідникових приладів / Л. М. Мірошніченко, О. С. Євстаф'єв, І. М. Журавська, О. М. Пусєв, М. В. Турти. № 93300896 ; заявл. 16.03.93 ; опубл. 26.12.94, Бюл. № 5-І.

82. Пат. на винахід 3033 Україна, МПК (2006.01) Н02М 3/335. Багатоканальний перетворювач напруги / О. М. Пусєв, І. М. Журавська, Л. М. Мірошніченко, В. М. Рябенький. № 93300894 ; заявл. 16.03.93 ; опубл. 26.12.94, Бюл. № 5-І.

З М І С Т

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	31
ВСТУП	33
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ РУХОМИХ МЕРЕЖ	48
1.1 Проблеми створення та функціонування гетерогенних швидкодинамічних комп'ютерних мереж критичного застосування.....	48
1.2 Існуючі підходи вирішення задач управління групою БПА	57
1.3 Способи обміну інформацією між об'єктами моніторингових мереж	68
1.4 Моделі поведінки об'єктів рою	72
1.5 Аналіз існуючих апаратно-програмних систем для вирішення задачі управління БПЛА	75
1.6 Планування маршрутів РММ	78
1.7 Формулювання задач дослідження	85
Висновки до Розділу 1	88
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ БЕЗПЛОТНИХ АПАРАТІВ	90
2.1 Фізична аналогія руху БПЛА та броунівського руху з польотами Лєві..	90
2.1.1 Теоретичні основи опису траєкторії руху БПЛА з використанням засад броунівського руху, описаного рівнянням Ланжевена	90
2.1.2 Імплементация теорії «прогулянок Лєві» для опису непередбачуваних перешкод на траєкторії руху БПЛА.....	98
2.2 Графо-аналітична форма запису функціональних структур математичної моделі руху БПЛА.....	103
2.3 Аналіз результатів математичного моделювання руху БПЛА	106
2.3.1 Мікро-моделювання руху БПЛА з урахуванням дрейфу.....	106
2.3.2 Мікро-моделювання руху БПЛА різного розміру.....	113
2.3.3 Аналітична оцінка якості мікро-моделі траєкторії руху БПЛА	116
2.4 Особливості побудови моделі при розробленні ройових алгоритмів	117
Висновки до Розділу 2	123

РОЗДІЛ 3	ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ БПЛА	
У ПРОСТОРОВИХ КОРИДОРАХ		124
3.1	Визначення території виконання завдання групою БПЛА та постановка задачі планування маршруту	124
3.2	Метод визначення площі функціонування зграї БПЛА на основі прямокутника Брахмагупти.....	134
3.2.1	<i>Топології РММ на основі БПА, розосереджених у двовимірному просторі</i>	<i>134</i>
3.2.2	<i>Визначення площі кластера мережі з одним головним БПЛА за різними топологіями РММ</i>	<i>137</i>
3.3	Моделювання групової поведінки об'єктів РММ	146
3.3.1	<i>Методи моделювання поведінки БПЛА у зграї.....</i>	<i>146</i>
3.3.2	<i>Моделювання поведінки суб-роїв БПА у просторових коридорах</i>	<i>155</i>
3.3.3	<i>Моделювання траєкторії руху гетерогенної зграї БПЛА за складною траєкторією з визначенням циклів дозарядки акумуляторів</i>	<i>168</i>
3.4	Синтез маршрутів суб-роїв БПЛА на основі нейронної мережі Хопфілда у просторових коридорах на місцевості	172
	Висновки до Розділу 3	190
РОЗДІЛ 4	РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОБМІНУ ДАНИМИ	
МІЖ ОБ'ЄКТАМИ РУХОМОЇ	МОНІТОРИНГОВОЇ МЕРЕЖІ	192
4.1	Забезпечення зв'язку у кіберфізичній системі з використанням рухомих пристроїв та хмарних сервісів.....	192
4.2	Розроблення засобів обліку великорозмірних об'єктів за допомогою рухомих моніторингових мереж.....	209
4.2.1	<i>Розроблення методу обліку великорозмірних об'єктів із запобіганням реєстрації сторонніх об'єктів та подвійної реєстрації.....</i>	<i>210</i>
4.2.2	<i>Виключення впливу руху реєстратора на результати обліку великорозмірних об'єктів.....</i>	<i>217</i>
4.2.3	<i>Розроблення математичної моделі мережі обліку великорозмірних об'єктів</i>	<i>223</i>

4.3 Розроблення та впровадження методу стеганографічного закриття в телекомунікації між БПЛА на основі Open Source протоколу MAVLink	226
Висновки до Розділу 4	240
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ТА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РУХОМОЇ МОНІТОРИНГОВОЇ МЕРЕЖІ	242
5.1 Покращення ефективності використання БПЛА шляхом розподілу завдань між ядрами процесора.....	242
5.1.1 <i>Аналіз ефективності розподілу завдань між ядрами обчислювального процесора БПЛА</i>	<i>242</i>
5.1.2 <i>Алгоритм енергоефективної роботи модулів ШГКМ з диспетчеризацією завдань.....</i>	<i>258</i>
5.2 Віддалене управління енергоспоживанням неперіоритетних пристроїв на борту БПЛА з обмеженими енергоресурсами.....	266
5.3 Передавання енергії між КФО бездротовими каналами.....	275
Висновки до Розділу 5	281
РОЗДІЛ 6 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ПРИКЛАДНИХ РІШЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ШВИДКОДИНАМІЧНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ МОНІТОРИНГОВИХ МЕРЕЖ	282
6.1 Комп'ютерна система реєстрації великорозмірних вантажів контейнерного типу за допомогою мобільних первинних реєстраторів.....	282
6.2 Виявлення місць витоку теплової енергії з прихованих об'єктів засобами комп'ютерної системи на основі РММ.....	290
6.3 Створення перспективних функціональних компонентів БПЛА для суброїв РММ з подовженим часом життя	300
6.4 Порівняння запропонованих методів та засобів з існуючими рішеннями	308
Висновки до Розділу 6	312
ВИСНОВКИ.....	313
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	318
Додаток А Характеристики використаних систем та компонентів	365

Додаток Б Програмний застосунок та результати моделювання руху БПЛА ..	380
Додаток В Акти впровадження результатів роботи.....	389
Додаток Г Сертифікати участі у Міжнародних програмах.....	399
Додаток Д Список праць за темою дисертації та відомості з апробації матеріалів дисертації.....	403

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БПА	–	безпілотний апарат
БПЛА	–	безпілотний літальний апарат
БШ	–	рівняння Блека-Шоулза
БШЛ	–	рівняння Блека-Шоулза з використанням розподілу Ліві
ШГКМ	–	швидкодинамічна гетерогенна комп'ютерна мережа
ЕМ	–	чисельний метод Ейлера-Маруями
ЕМЛ	–	Ейлера-Маруями з урахуванням «прогулянок Ліві»
КО	–	кібер-оператор
КС	–	комп'ютерна система
КФО	–	кіберфізичний об'єкт
КФС	–	кіберфізична система
КЦ	–	командний центр
НКРЗІ	–	Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформатизації України
НМХ	–	нейронна мережа Хопфілда
ОС	–	операційна система
РЕБ	–	радіоелектронна боротьба
РМ	–	рухома мережа
РММ	–	рухома моніторингова мережа
СВР	–	стаціонарний вантажний робот
СДР	–	стохастичне диференціальне рівняння
СУ	–	система управління
ТД	–	точка доступу
ТР	–	транспортний робот
ЦОД	–	центр обробки даних
API	–	Application development interface
CO	–	Cyber-operator
CPO	–	Cyber-physical object

CPS	–	Cyber-physical system
CPU	–	Central processing unit
DARPA	–	Defense Advanced Research Projects Agency
FPV	–	First person view
GCS	–	Ground control station
HetNet	–	Heterogeneous network
HNN	–	Hopfield neural network
ISM band	–	Industrial, scientific, and medical radio band
MMN	–	Mobile monitoring network
OS	–	Operation system
RF	–	Radio frequency
SDK	–	Software development kit
TMR	–	Tactical mobile robots
TSP	–	Traveling salesman problem
UAV	–	Unmanned aerial vehicle (or drone)
UGV	–	Unmanned ground vehicle
UI	–	User interface
UMV	–	Unmanned vehicle
UUV	–	Unmanned underwater vehicles
USV	–	Unmanned water (surface) vehicles
VLAN	–	Virtual (logical) local area network

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Прогрес у різноманітності моделей та у технічних характеристиках безпілотних апаратів (БПА, інакше дронів або роботів), спроможних виконувати свої функції як під управлінням диспетчерського (командного) центру (КЦ), кібер-операторів, так і автономно, на великій відстані від власників та центрів управління обумовив їх стрімке поширення для вирішення наукової, соціально-економічної та безпекової проблематики світового рівня у різних галузях господарства, де доцільно використовувати кіберфізичні системи (КФС, англ. Cyber-Physical System або CPS) [137, 161].

Найбільшого поширення набули БПА, що переміщуються у повітряному середовищі, тобто безпілотні літальних апаратів (БПЛА – англ. Unmanned Aerial Vehicle або UAV, для визначення яких також використовуються терміни «дрон» або «боїд» – птахоподібний об'єкт). Перші некеровані літальні апарати, що використовують принцип групової самоорганізації (принцип «зграї»), були створені в СРСР в 1970-х роках. Це були крилаті ракети «Граніт», призначені для удару по авіаносним угрупованням противника з використанням ядерних зарядів. Однак до самих недавніх пір лише великі апарати мали достатню масу для інтеграції систем зв'язку і комп'ютерів, необхідних для реалізації принципу зграї.

У 2017 р. Міністерство оборони США зробило наступний крок щодо переведення зграй на рівень легких тактичних розвідувальних апаратів (прототип ThunderDrone від компанії SOFTWERX) з модульним оснащенням, які спроможні діяти у відриві від власних військово-повітряних сил та засобів протиповітряної оборони. Технічні подробиці про новий американський безпілотник Thunderdrone поки засекречені. Відомо лише, що бортове обладнання апарату буде виконано у вигляді взаємозамінних модулів для об'єднання у зграї з іншими безпілотниками [248].

Активні напрацювання робляться щодо об'єднування в мережі дронів різних типів у зграї БПЛА ведуться і російським військово-промисловим комплексом (програмна платформа «Унікум»), але поки жоден спеціалізований

«зграйний» апарат, подібний ThunderDrone, на озброєння ще не прийнятий. Основне, що зараз стримує прорив в технології маленьких дронів, – це невеликий час дії заряду акумуляторної батареї. До того ж, необхідні розробки автономних режимів роботи апарату, навіть в умовах тотального перекриття супутникового навігаційного сигналу.

Безпілотні автономні системи (як поодинокі, так і караванного типу) вже використовуються та плануються до впровадження у різних галузях господарства – вантажних перевезеннях морським (нп., проект AAWA компанії Rolls-Royce у Фінляндії, безпілотний есминець «Sea Hunter» у США до 19 тис. км), повітряним (нп., корпорація Google дронами Project Wing до 10 км, підприємство Укрпошта дронами Flytrex, а також поштові служби США, Німеччини, Швейцарії, Австралії тощо, які вже інтенсивно тестують подібне обладнання), автотранспортом (безпілотні вантажівки в напівавтономному режимі компаній Volvo, Scania, TuSimple до 1,7 тис. км та ін.).

Поширюється у світі створення цілих «флотів» з над-/підводних («караванів» з наземних або «зграй» з літальних) БПА для військових потреб. Міністерство оборони США анонсувало запуск у жовтні 2016 р. рою з 103 міні-безпілотників Perdix. У бюджеті на 2019 р. Міністерство оборони запросило близько \$ 9,39 млрд для безпілотних систем і пов'язаних з ними технологій. В цієї сумі передбачено фінансування закупівель 3447 нових повітряних, наземних і морських дронів [0]. Компанія Intel вже запускала рій з 1218 дронів з централізованим управлінням на церемонії відкриття зимової Олімпіади в Південній Кореї (2018 р.) та планує збільшити кількість безпілотних літаків у групі до 1500 штук [89].

У Китаї в червні 2017 р. заявили про створення рою з 119 БПЛА, який функціонує на основі штучного інтелекту. У квітні 2018 р. китайський виробник БПЛА «Ehang Egret» запустив зграю з 1374 дронів (4 ряди на 1200 м), керованих з одного комп'ютера (наземної станції), але через перешкоди дрони порушили формацію, а під кінець декілька з них впали на землю [369]. Зграя функціонувала

близько 13 хв, хоча за технічною документацією тривалість польоту використаної моделі GHOSTDRONE 2.0 становить 25 хвилин [55].

В той же час оборонно-промисловий комплекс Росії та Великобританії активно займається розробкою засобів радіоелектронної боротьби (нп., сімейство комплексів радіоелектронної боротьби «Красуха») та електронної війни на основі нейромережових алгоритмів [370]. Такі засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ) спроможні порушити обмін даними та управління БПЛА й заблокувати дії рою.

В таких умовах актуальним є вирішення проблеми автономної поведінки БПЛА з дотриманням вимог щодо конфіденційності інформації про їх місцезнаходження.

Розробкою керованих та автономних інформаційно-вимірювальних систем та компонентів до них займалася велика кількість провідних вчених та науковців: R. Austin [15], J. Child [34], R. D'Andrea [48], M. Durišić, Z. Z. Tafa, G. Dimić, V. Milutinović [57], M. W. Müller [130], Y. S. Choi, J. S. Park [84], T. Prevot, P. Kopardekar, J. Rios, J. Jung [149], Yi. Tan [187], W. Zhang [216], О. Д. Азаров [316], С. Г. Антощук [232], М. І. Васюхін [242], В. С. Глухов [85], І. Д. Горбенко [361], І. А. Жуков [257], О. В. Збруцький [318], В. М. Карташов [235], В. П. Квасніков [308], Р. Н. Кветний [310], Ю. П. Кондратенко [209], В. В. Кочан [376], А. Я. Кулик [310], Г. А. Кучук [322], С. В. Ленков [325], В. Лужецький [327], М. В. Максимов [231], А. О. Мельник [123], М. А. Мірошник [332], В. В. Нікольський [342], В. М. Опанасенко [346], Д. П. Орнатський [309], В. М. Рудницький [371], А. О. Саченко [166], С. Г. Семенов [377], В. С. Ситніков [380], С. О. Субботін [383], О. М. Трунов [387], М. Т. Фісун [392], В. С. Харченко [101], В. І. Хаханов [76], О. К. Юдін [399], В. В. Яцків [214] та багато інших.

Але більшість запропонованих рішень мають обмеження щодо обсягу інформації, обробленої та передаваної в одиницю часу. Таким чином, недостатньо дослідженими залишаються рухомі комп'ютерні мережі з ознаками швидкодинамічності – тобто, з навігацією рухомого об'єкта за картою на швидкості вище 3 м/с з передачею відеотрафіка вище 7 кадрів/с та з іншими характеристиками, що вимагають обробки та прийняття рішень у стислий час.

Крім того, швидкий розвиток конкурентоспроможних рішень на ринку комп'ютерних компонентів для БПЛА зумовив відсутність актуальних досліджень в напрямку співвідношення зростаючого їх енергоспоживання та часу працездатності батарей для живлення безпілотних апаратів. Гетерогенність електронно-обчислювального обладнання на борту БПЛА і каналів зв'язку між ними та з командним центром (КЦ) на теперішній час не врахована у повній мірі при визначенні часу життя швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж (ШГКМ). Особливої важливості ця проблематика набуває в задачах критичного застосування зграй БПЛА при моніторингу аварійних станів промислових об'єктів та в рятувальних операціях над територією певної площі.

Крім того, специфіка роботи обладнання рухомих комп'ютерних мереж на основі мультикоптерів, планерів й т. п. БПЛА супроводжена особливими ризиками і великою кількістю чинників, що впливають на умови їх експлуатації, а саме:

- місце передбачуваного функціонування (житлові масиви або масиви зелених насаджень, наявність механічних перешкод, електромагнітний вплив від лінії електропередачі, трансформаторних підстанцій, базових станцій мобільних операторів тощо);

- погодні умови (вітер, низька температура, підвищена вологість, дощ, так як електронне обладнання та фото-відео техніка вийде з ладу від попадання вологи на електроніку та інші елементи обладнання або БПЛА істотно відхилиться від заданого маршруту);

- польоти в нічний і вечірній час й т. ін.

Отже, функціонування зазначених мереж на основі зграй БПЛА в складних місцях з підвищеною небезпекою можна в загальному вигляді назвати критичним застосуванням і необхідно розглядати з урахуванням вищезгаданого.

Актуальним у зв'язку з цим стає завдання дослідження методів та засобів створення та функціонування зграй БПЛА, які складаються з суб-роїв БПЛА, що взаємодіють між собою, іншими кіберфізичними об'єктами (КФО) та з наземними пунктами управління або КЦ. Урахування зовнішніх впливів на

режими роботи бортового обладнання БПЛА, розробка теоретичних основ, методів та засобів створення та функціонування ШГКМ на основі БПЛА надасть змогу суттєво поліпшити енергоефективність та подовжити час життя зазначених рухомих мереж.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності до завдань таких програм:

– Програми інформатизації Миколаївської області на 2004-2006 роки (розпорядження голови Миколаївської облдержадміністрації від 07 липня 2004 р. № 310-р), в якій здобувач брала участь як заступник голови науково-технічної ради;

– Міжнародних програм ЄС TEMPUS: «Green Computing and Communications» (TEMPUS GreenCo, Ref. No. 530270-TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR, 2012–2015 pp.), «Model-Oriented Approach and Intelligent Knowledge-Based System for Evolvable Academia-Industry Cooperation in Electronic and Computer Engineering» (TEMPUS CABRIOLET, Ref. No. 544497-TEMPUS-1-2013-1-UK-TEMPUS-JPHES, 2012–2015 pp.), «Modernization of Postgraduate Studies on Security and Resilience for Human and Industry Related Domains» (TEMPUS SEREIN, Ref. No. 543968-TEMPUS-1-2013-1-EE-TEMPUS-JPCR, 2013–2017 pp.), в яких здобувач взяла участь як ментор проектів «A Solution to Protect Your Privacy and Your Data» (WiSafe, *ДРУГЕ місце*) та «Recovering Adaptive System of Access with Password to WiFi-Network and Testing of Network Security (RASAP)» (вересень 2015 р.);

– Міжнародної програми ЄС TEMPUS: «National Education Framework for Enhancing IT Students' Innovation and Entrepreneurship» (NEFESIE, Ref. No. 530576-TEMPUS-1-2012-1-SE-TEMPUS-SMHES), II-й етап Всеукраїнського конкурсу IT-проектів «IT-EUREKA! UKRAINE» (Національний університет «Львівська політехніка»), в якому здобувач взяла участь як тренер проекту «C.A.D.\y (Cut and Dry)» (*ПЕРШЕ місце*, травень 2016 р.);

– Міжнародної програми ЄС Erasmus+ «Internet of Things: Emerging Curriculum for Industry and Human Applications» (Erasmus+ ALIOT, Ref. No.

573818-EPP-1-2016-1-UK–EPPKA2-CBHE–JP, 2016–2019 pp.), в якій здобувач взяла участь як співавтор модулю «IoT Infrastructure for Smart Energy Grid (SEG) Based on Embedded System Devices» (ITM1.4) та ментор проекту «Devising of Solutions Harvesting Data from Home Energy Meters via PLC Technology» (травень 2017 р.);

– Міжнародної програми ЄС Erasmus+ «Innovative Multidisciplinary Curriculum in Artificial Implants for Bio-Engineering BSc/MSc Degrees» (BIOART, Ref. No. 586114-EPP-1-2017-1-ES-EPPKA2-CBHE–JP, 2017–2020 pp.), The 2nd International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems «CMIS–2019» (Запорізький національний технічний університет), в якому здобувач взяла участь як доповідач (квітень 2019 р.);

– науково-дослідної роботи (надалі – НДР) Інституту імпульсних процесів та технологій (ІШТ) НАН України «Провести дослідження та створити регульований генератор імпульсних струмів для різноімпедансного нелінійного навантаження» (№ держ. реєстрації 0195U020694, 1996 р.), в якій здобувач брала участь як виконавець;

– НДР Чорноморського державного університету ім. Петра Могили «Розроблення поліметричних датчиків інформаційно-вимірювальних систем з живленням елементів від вимірювального сигналу» (№ держ. реєстрації 0115U000316, 2015–2016 pp.), в якій здобувач брала участь як виконавець;

– НДР Чорноморського національного університету (ЧНУ) ім. Петра Могили «Розроблення найсучаснішого інтерактивного навчально-тренажерного та аналітично-консультативного комплексу військово-цивільного призначення» (№ держ. реєстрації №0118U000193, 2018–2019 pp.), в якій брала участь як виконавець;

– НДР ЧНУ ім. Петра Могили «Розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення» (№ держ. реєстрації 0117U000447, 2017–2018 pp.), в якій здобувач брала участь як відповідальний виконавець;

– НДР ЧНУ ім. Петра Могили «Розроблення мобільних малогабаритних та стаціонарних бездротових приладів ранньої діагностики, профілактики, лікування та посттравматичних відновлень військово-цивільного застосування» (№ держ. реєстрації 0119U100422, 2019–2020 рр.), в якій здобувач брала участь як відповідальний виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж (ШГКМ) критичного застосування за рахунок подовження часу життя БПЛА та підвищення стійкості ШГКМ до перешкод і зовнішніх впливів різного походження.

Для досягнення визначеної мети були сформульовані та вирішені такі **задачі:**

– провести аналіз сучасного стану та шляхів удосконалення методів створення та функціонування гетерогенних комп'ютерних мереж на основі БПЛА;

– розробити теоретичні основи опису руху БПЛА з використанням засад броунівського руху з урахуванням дрейфу та розміру БПЛА при їх ройовому використанні;

– розробити метод визначення площі функціонування зграї БПЛА з урахуванням зміни топології рухомих моніторингових мереж (РММ) та уточненням необстеженої площі на місцевості в обмежених просторових коридорах з подальшою конкатенацією знайдених рішень та синтезом суб-оптимальних маршрутів;

– розробити засоби обліку великорозмірних об'єктів за допомогою РММ з гарантованою доставкою інформації та удосконаленням захисту даних щодо місцезнаходження рухомих реєстраторів;

– розробити теоретичні основи аналізу та інтелектуалізації системи управління навантаженням БПЛА технологічними завданнями з розподілом їх між ядрами однокристального процесора (CPU та/або GPU) БПЛА з вивільненням окремого ядра для задач управління польотом, відключенням

непріоритетних пристроїв та передаванням енергії між КФО за технологією PoWiFi;

– розробити комп'ютерні системи з використанням ШГKM для вирішення прикладних завдань, провести експериментальні дослідження їх застосування у різних галузях, розробити конструкції елементів БПЛА, здатні подовжити час життя ШГKM та захист даних на БПЛА.

Об'єктом дослідження є процеси створення та функціонування рухомих комп'ютерних мереж.

Предмет дослідження – моделі, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування.

Методи дослідження. В процесі досліджень використані методи побудови розподілених комп'ютерних систем та принципи інтелекту рою, методи стохастичної динаміки з використанням чисельних методів вирішення рівняння Ланжевена з урахуванням «прогулянок Ліві», теорія передачі інформації в комп'ютерних системах, методи захисту даних стеганографічними засобами, методи і засоби проектування й імплементації програмних систем в апаратні рішення, методи математичного та комп'ютерного моделювання на базі багатфункційного математичного пакету MATLAB з розробленням додаткових програмних модулів.

Наукова новизна отриманих результатів:

вперше запропоновано:

– метод визначення часу життя ШГKM критичного застосування за рахунок обчислення траєкторії руху з врахуванням впливу зовнішніх збурень та механічних перешкод, що дозволяє попередити втрату БПЛА та уточнити паспортний час роботи БПЛА в залежності від особливостей його експлуатації;

– метод синтезу суб-оптимальних маршрутів суб-роїв БПЛА на базі нейронної мережі Хопфілда за рахунок використання бінарної моделі польотної карти, що дозволяє здійснювати «самозагоєння» рою під час критичного застосування ШГKM;

– метод усунення дублювання виконання функцій БПЛА за рахунок розроблених засобів управління режимами роботи неперіоритетних модулів БПА, що дозволяє зменшити енерговитрати ШГКМ;

удосконалено:

– метод моделювання траєкторії БПЛА на основі стохастичних диференціальних рівнянь Ланжевена для броунівського руху за рахунок застосування «прогулянок Лєві»/«польотів Лєві», фінансової моделі Блека-Шоулза з описом їх в графо-аналітичній формі з врахуванням функціональних блоків БПЛА, що дозволяє враховувати у траєкторії БПЛА механічні перешкоди та зовнішні збурення;

– метод підвищення криптостійкості передаваних повідомлень зі стеганографічним закриттям корисної інформації за рахунок розміщення інформації про місцеположення БПЛА у стегоконтейнері в межах вільного місця кадрів протоколу передачі відкритих даних, що дозволяє підвищити рівень безпеки функціонування ШГКМ;

набули подальшого розвитку:

– метод гарантованої доставки інформації між кібер-фізичними (КФО) об'єктами з використання трансферних вузлів та хмарних сервісів, за рахунок зміни протоколу взаємодії між КФО шляхом додання параметрів режиму функціонування БПЛА та умов їх настання, що дозволяє забезпечити функціонування ШГКМ при відсутності зв'язку між КФО;

– математична модель диспетчеризації завдань в багатоядерних однопроцесорних комп'ютерних системах з обмеженими енергетичними ресурсами за рахунок введення коефіцієнтів активності кожного ядра, що дозволило зменшити енергоспоживання процесора та підвищити швидкість реагування на критичну ситуації;

– метод бездротового передавання енергії між КФО на основі технології PoWiFi за рахунок застосування розробленої циклограми з чергуванням інтервалів передачі даних та інтервалів передавання енергії, що дозволяє збільшити час життя ШГКМ.

Практичне значення отриманих результатів:

– отримані показники реального часу життя акумуляторів БПЛА, що уточнюють паспортний час роботи БПЛА 1-го класу в залежності від умов експлуатації. Рішення отримані у пакеті MATLAB за допомогою метода Ейлера-Маруями, найменш вимогливого до обчислювальних ресурсів комп'ютерних систем, що дозволяє застосовувати їх при швидкодинамічному використанні БПЛА;

– розроблений протокол взаємодії GPS-модуля Об'єкта з Клієнтом кіберфізичної системи (КФС), яка складається зі зграї БПЛА та наземного КЦ (кібероператорів), через хмарний сервіс Google FireBase, що дозволяє в швидкодинамічних гетерогенних РММ коригувати задачу кожного Об'єкта КФС вже під час її виконання;

– розроблений алгоритм резервування ресурсів окремого ядра багатоядерного однокристального обчислювального процесора (CPU) БПЛА для обчислень першочергової важливості (задач управління польотом);

– розроблені структурні та схемотехнічні рішення гетерогенної моніторингової мережі реєстрації морських контейнерів, що перенесені через борт судна портокраном, для інформування капітану судна засобами локальної мережі судна без підключення до Інтернет та без задіяння пропрієтарного програмного забезпечення власників контейнерів. Розроблені алгоритмічні та схемотехнічні рішення забезпечують запобігання подвійної реєстрації та реєстрації руху сторонніх об'єктів;

– розроблені перспективні конструктивні рішення функціональних компонентів БПЛА (захищені патентами №№ 130607, 130195, 132326) з подовженим життєвим циклом останніх за рахунок більш економного витрачання заряду акумуляторів під час формування підйомної сили БПЛА;

– розроблені структурні та конструктивні рішення малогабаритних БПЛА (захищені патентом № 130608 України), в яких за рахунок впровадження підсистеми катапультивання блоків пам'яті та визначення GPS координат БПЛА

зادля непопадання до конкурентних осіб та оповіщення командного центру про координати падіння модулю.

Слід зазначити, що більшість рішень, отриманих в дисертаційному дослідженні для БПЛА, є працездатними та ефективними для інших типів БПА, що пересуваються в іншому, не тільки повітряному, середовищі.

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено:

– на контейнеровозі «CSCL Uranus» (zareєстрований у Hong Kong) у вигляді комп'ютерної системи інформування капітана про кількість перенесених через борт судна контейнерів у кожній секції контейнеровоза;

– у відділі з експлуатації житлового господарства департаменту житлово-комунального господарства Миколаївської міської ради для пошуку тепловитоків в інженерних комунікаціях на основі дослідження теплових карт за даними пірометричного та тепловізорного обладнання на борту БПЛА, поєднаних у швидкодинамічну комп'ютерну мережу з подовженим часом функціонування;

– на підприємстві ТОВ «Добробут» (м. Миколаїв) при вдосконаленні інструментального забезпечення технології обстеження та визначення стану елементів конструкції житлових будинків за допомогою розробленої рухомої моніторингової системи з використанням трансферних вузлів та хмарних сервісів;

– на підприємстві ТОВ «Схід-Захід-Енерго» (м. Миколаїв) для забезпечення захищеного зв'язку між об'єктами розгалуженої мережі складів за рахунок стеганографічного закриття GPS-координат зазначених об'єктів;

– при виконанні науково-дослідних робіт, які виконувались в ІПТ НАН України та в ЧНУ ім. Петра Могили;

– у навчальному процесі кафедри комп'ютерної інженерії та кафедри інтелектуальних інформаційних систем ЧНУ ім. Петра Могили при проведенні лекційних, практичних та лабораторних робіт з дисциплін «Кібербезпека», «Технології захисту інформації», «Комп'ютерні мережі» та ін., а також при

підготовці магістерських робіт зі спеціальностей «Комп'ютерні науки» та «Комп'ютерна інженерія».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно та опубліковані в роботах [2, 8, 13–17, 27, 28, 47, 48, 50, 57, 75, 77–79]. У працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача наступний: [1] – досліджено особливості управління групою БПЛА з уникненням зіткнення, методи та алгоритми, що забезпечують тривалий термін служби зграй і захищену передачу інформації в гетерогенній мережі; [22, 56, 62] – виконано збирання, систематизація, аналізування та узагальнення інформації з розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення; [7, 21, 33] – запропоновано і досліджено використання нейронних мереж Хопфілда для розроблення суб-оптимальних маршрутів суб-роїв БПЛА при функціонуванні у розділених просторових коридорах; [6, 29, 37, 49] – досліджено механізми впровадження застосування хмарних сервісів для подальшого розвитку методу гарантованої доставки інформації між КФО; [30, 63–65, 69, 70] – розглянуті моделі систем для впровадження безпечних механізмів обміну даними через хмарні сервіси та засобами бездротових каналів зв'язку; [20, 58–60, 66, 76] – запроваджено використання геш-функцій в методі шифрування на базі операції XOR та метод стеганографічного закриття GPS-координат КФО; [9, 10, 12, 35, 41, 42, 46] – запропоновано удосконалену математичну модель диспетчеризації завдань багатопроцесорних систем, розроблено алгоритм оптимального навантаження технологічними завданнями ядер однокристального процесора обчислювальної плати (CPU та/або GPU) на кібер-об'єкті з вивільненням першого ядра для задач управління зграєю БПЛА, прийнята участь в експериментальних дослідженнях, аналізуванні результатів, підготовленні публікацій; [5] – створено алгоритмічне забезпечення процесу додаткової підзарядки акумуляторів КФО під час функціонування бездротових інформаційно-вимірювальних мереж за рахунок передавання енергії між КФО, розроблено циклограму за, якою передбачене чергування інтервалів передачі

даних та передавання енергії за технологією PoWiFi, підготовлено публікацію; [11, 18, 24, 25, 44, 53–55, 61, 73] – прийнята участь в розробленні програмних та схемотехнічних рішень комп'ютерних компонентів пристроїв і виконанні досліджень, зокрема систем управління характеристиками апаратури на борту БПЛА, аналізуванні отриманих результатів і підготовленні публікацій; [3, 39] – запропоновано метод визначення площі функціонування БПА при модифікації топології гетерогенної РММ на базі БПЛА, взята участь в розробленні математичної моделі системи з динамічною структурою, у підготовленні публікацій; [4, 23, 31, 32, 34, 66, 67, 71, 72, 74] – виконано дослідження принципів передачі інформації в гетерогенних комп'ютерних мережах, створення алгоритмів для зменшення рівня втрат та мінімізації затримки передачі даних, в аналізуванні та візуалізації трафіка; [38, 43] – розроблено теоретичні засади створення рухомих інформаційно-вимірювальних систем моніторингу температурного режиму побутових споруд, прийнята участь у розробленні програмного забезпечення для побудування теплових картографічних моделей місцевості, проведенні натурних експериментів; [19, 36, 51, 52] – розроблені структурні та схемотехнічні рішення гетерогенної моніторингової мережі реєстрації морських контейнерів, що перенесені через борт судна портокраном; [40, 45] – розроблені алгоритмічні та схемотехнічні рішення для обліку рухомих великорозмірних вантажів у пунктах пропуску із запобіганням подвійної реєстрації; [27, 28, 79] – запропоновано ідею винаходів, виконано складання формул винаходів; [26, 80–82] – обґрунтовано технічні рішення винаходів, прийнята участь в їх експериментальній апробації, у підготовленні заявок до опублікування.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на 38 Міжнародних і Всеукраїнських науково-технічних конференціях та наукових симпозиумах: 2nd Int. Workshop “Computer Modeling and Intelligent Systems CMIS’2019” (Запоріжжя, 2019), 4th IEEE Int. Symp. “Wireless Systems within the IEEE Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems

IEEE IDAACS-SWS'2018" (Львів, 2018), 8th IEEE Int. Conf. "Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications IDAACS'2017 (Bucharest, 2017), 1st IEEE Int. Scientific and Technical Conf. "Data Stream Mining & Processing DSMP-2016" (Львів – Старе Село, 2016), 36th IEEE Int. Conf. "Electronics and Nanotechnology ELNANO-2016" (Київ, 2016), Int. Scientific-Practical Conf. "Science and Innovation in the XXI century" (London, 2014), 5th Int. Scientific Conf. "Applied Sciences in Europe: Tendencies of Contemporary Development" (Stuttgart, 2014), 2nd та 4th Int. Scientific Conf. "Information technology and interactions IT&T" (Київ, 2015, 2017), 11th Int. Algebraic Conf. in Ukraine dedicated to the 75th anniversary of V. V. Kirichenko (Київ, 2017), VII, IX та X Міжнар. наук.-практ. конф. "Free and Open Source Software FOSS" (Харків, 2015, 2017, 2018), XI, XII та XIII Міжнар. наук.-практ. конф. «Ольвійський форум: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі» (Миколаїв, 2017, 2018, 2019), XIII Міжнар. наук.-практ. конф. «Військова освіта і наука: сьогоднішня та майбутня» (Київ, 2017), V та VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації» (Вінниця, 2016, 2017), VI Міжнар. наук.-техн. конф. «Датчики, прилади та системи ДПС – 2017» (Черкаси–Миколаїв–Херсон–Лазурне, 2017), Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами» (Луцьк, 2017), II Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційна безпека та комп'ютерні технології IS&CT 2017» (Кропивницький, 2017), IX Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT – 2017» (Херсон, 2017), X Міжнар. наук.-практ. конф. «Інтернет – Освіта – Наука – 2016» (Вінниця, 2016), VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Надзвичайні ситуації: безпека та захист НСБЗ'2016» (Черкаси, 2016), V Міжнар. наук. конф. «Інформація, комунікація, суспільство ICS – 2016» (Львів – Славське, 2016), Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології ІУСТ» (Одеса, 2013), III, IV та V Міжнар. наук.-техн. конф. «Комп'ютерні системи та мережеві технології CSNT» (Київ, 2010, 2011, 2012),

III Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Сучасні проблеми інформаційної безпеки на транспорті» (Миколаїв, 2013), XVIII, XIX та XX Всеукр. наук.-метод. конф. «Могілянські читання» (Миколаїв, 2015, 2016, 2017 рр.), Всеукр. наук.-практ. конф. «Інтелектуальні інформаційні системи» (Миколаїв, 2016, 2017, 2019), IX Всеукр. наук.-практ. конф. «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі КІСМ – 2016» (Кривий Ріг, 2016). Крім цього, дисертаційна робота у повному обсязі представлена на наукових семінарах кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 82 наукових праці, у т. ч.: 2 монографії (у т. ч. 1 англійською мовою у співавторстві видана за кордоном та 1 українською мовою одноосібна), 23 статті у фахових журналах, що входять до переліку МОН України (з них 5 статей у періодичних виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та/або Web of Science, 9 статей проіндексовано в наукометричній базі Index Copernicus), 2 навч. та навч.-метод. посібники, 5 друкованих праць конференцій, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та/або Web of Science, 43 тези доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях, 7 деклараційних патентів України на корисні моделі.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел (400 найменувань) і 5 додатків. Загальний обсяг роботи становить 416 сторінок друкованого тексту, з них 285 сторінок основного тексту, 142 рисунки, 21 таблиця.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ РУХОМИХ МЕРЕЖ

1.1 Проблеми створення та функціонування гетерогенних швидкодинамічних комп'ютерних мереж критичного застосування

В основу дослідження покладено ідею створення та використання рухомих комп'ютерних мереж критичного застосування з подовженим часом енергонезалежності на базі автономної та дистанційно керованої взаємодії КФО, які поєднані у суб-рої для виконання мікро-завдань, з подальшим розгляданням таких суб-роїв як частин зграї БПЛА, що виконує єдину макро-задачу [226]. Тобто, рій та суб-рій (англ. Swarm & Sub-swarm) – це менша спільнота ніж зграя (англ. Flock), та виконує часткові завдання, які можуть відрізнятися від завдань інших суб-роїв. Розмір таких завдань визначається обмеженими обчислювальними ресурсами на борту БПЛА. Зграя – більш головне поняття. Наприклад, для РММ на рівні зграї узагальнюється та наноситься на єдину мапу місцевості вся інформація, здобута суб-роями. Тому результати процесу вимірювання (нп., заміри температури, показників забрудненості та/або випромінювання у зоні функційного модуля, фотографії об'єктів на обстежених невеликих ділянках території, тощо) у шифрованому та/або стеганографічному вигляді передаються у складі загальної інформації до головного БПЛА та/або диспетчерського центру компанії-власника засобами досяжних відкритих каналів зв'язку.

Проте, при розробленні таких систем виникає чимало важливих науково-технічних питань, які на сьогоднішній день поки що не вирішені: вибір архітектури обчислювального елемента на борту БПЛА та методи оптимального використання його компонентів, оптимальні топології розташування кіберфізичних об'єктів (КФО, англ. Cyber-Physical Object або CPO) у ШГКМ в реальному часі, вибір параметрів бездротової технології передачі даних, забезпечення гарантованого та захищеного зв'язку між КФО мережі, оптимальні

Розглядаючи зведені показники гетерогенності РММ, слід враховувати також класифікації БПЛА, розроблені Державіаслужбою України з урахуванням маси і типу управління [360, 385]. За масою БПЛА діляться на 4 класи:

- а) *0-ий клас* (дуже малі) – до 250 грам;
- б) *1-ий клас* (малі) – від 250 грам до 20 кг;
- в) *2-ий клас* (середні) – від 20 кг до 150 кг;
- г) *3-ий клас* (великі) – понад 150 кг.

Класифікація БПЛА за типом управління:

- а) *клас А* – ручний візуальний;
- б) *клас В* – ручний інструментальний;
- в) *клас С* – автономний.

В роботі вбачається, що в межах одної зграї використовуються БПЛА першого або другого класу (малі або середні), що побудовані за різними аеродинамічними схемами (літакового, вертолітного, гібридного, мультироторного типу або ін.) та живленням від акумуляторних батарей. Використання БПЛА інших класів накладає певні обмеження на використання зграї БПЛА в цілому і на якість виконання мікро-завдання. Дослідження таких обмежень виходить за рамки даної роботи.

Зростаюча неоднорідність призводить до значного підвищення складності управління пристроями та сервісами у складі РММ та потребує детальніших досліджень процесів побудування та ефективність послуг з цих мереж. Саме гетерогенність запроваджених рішень спроможна забезпечити масштабованість послуг комунікації між КФО при критичному застосуванні в надзвичайних ситуаціях, в місцях лиха та в екстремальних умовах. Гетерогенні бездротові мережі нині підтримуються останніми технологічними досягненнями в галузі бездротового зв'язку, а також інтеграцією різних функцій, таких як зондування, зв'язок, інтелект і активні дії. ШГКМ виступають важливим класом комп'ютерних систем на основі нових платформ та інтерфейсів з низькими витратами на енергоспоживання, можливістю обробки великих обсягів даних з біологічних, хімічних та інших галузей, використання у приватних, виробничих,

медичних, технічних, військових цілях та у моніторингу навколишнього середовища.

Слід зазначити, що у процесі розвитку ШГКМ стають все більш динамічними. Характеристика «динамічності» потребує більш детального розвитку, зважаючи на те, що зростає не лише складність цих мережевих систем та їх компонентів (датчиків), але зростають також швидкості переміщення КФО у РММ. Зважаючи на те, що до об'єкту дослідження віднесені процеси саме у швидкодинамічних РММ, доцільно визначити їх місце серед усіх динамічних систем (рис. 1.2).

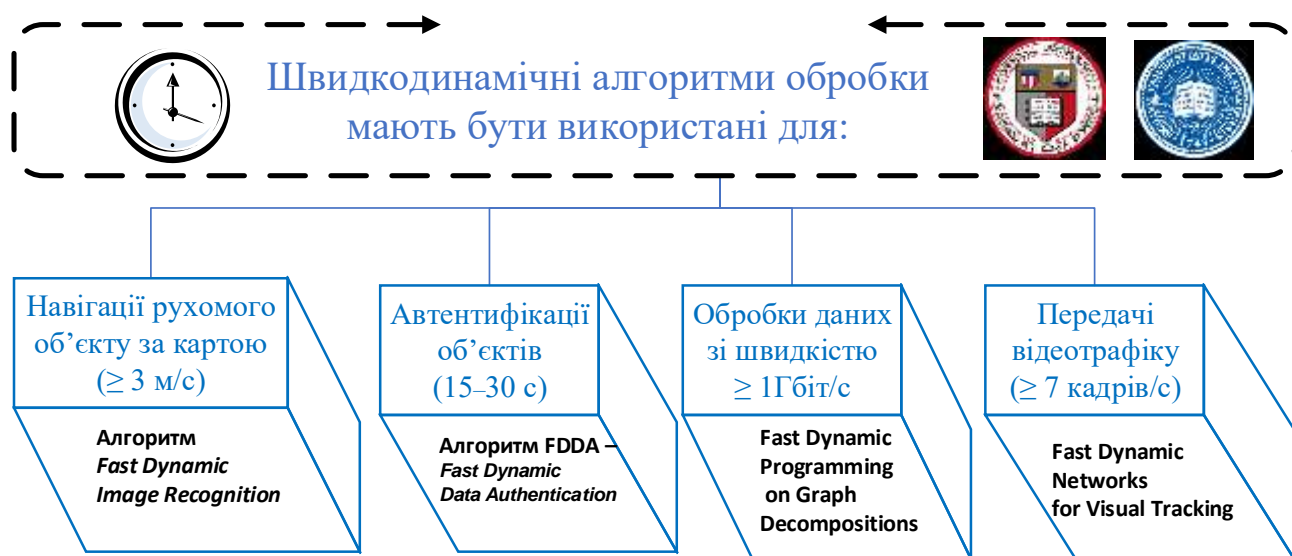


Рисунок 1.2 – Швидкодинамічні процеси в РММ

На відміну від звичних «динамічних систем», яким властива детермінованість і можна визначити множину всіх можливих станів такої системи у будь-який момент часу, для «швидкодинамічних систем» неможливо однозначно передбачити всю їх подальшу поведінку. Навіть знаючи координати і швидкість такої системи в початковий момент часу, не можна наперед визначити механічні або електромагнітні завади, з якими рухома швидкодинамічна система стикнеться під час функціонування. Тому по-перше від такої системи очікується швидкодинамічний час відгуку. Зважаючи на те, що теоретичні засади рухомих комп'ютерних мереж базуються на поведінковій теорії зграй біологічних об'єктів, такий час для них становить до 1 с фіксації на кадрі. За визначенням до швидкодинамічних відносяться такі процеси, як удар,

зіткнення та ін., що ведуть до деградації системи [77]. Це може бути втрата якості сигналу зв'язку, руйнування топології РММ та інші чинники, які потребують додаткових досліджень процесу подальшого функціонування такої комп'ютерної системи (КС).

В такому разі для попередження критичної ситуації або для виходу з неї обробка даних в КС здійснюється на швидкостях порядку гігабіт/с (Gbps). В закордонній науковій літературі для комп'ютерних мереж, що обробляють дані з такою швидкістю, застосовується поняття «A Fast Dynamic» (дослівно українською «швидкодинамічні»). Термін був започаткований у 2014 р. на факультетах комп'ютерної інженерії та комп'ютерних наук Делаверського університету (один з перших університетів США) та набув поширення до сьогодні, коли у 2018 р. в академічних стандартах Корнельського університету (одного з 8 членів «Ліги плюща») була наголошена необхідність запровадження швидкодинамічних алгоритмів замість традиційних при передаванні відеотрафіка, більшого ніж 1 Гбіт/с або 7 кадрів/с [47].

Швидкодинамічне програмування із застосуванням як математичних методів оптимізації, так і методів комп'ютерного програмування має передбачати декомпозицію дерев графу на гілки для покращення часу виконання завдань. Застосовно до компонентної бази КС такий підхід означає необхідність дослідження міграції швидкодинамічних процесів з одного комп'ютерного середовища до іншого, наприклад, між ядрами багатоядерного обчислювального процесора, між обчислювальним та графічним процесорами – CPU та GPU – або між обчислювальними процесорами різних КС [163]. Незалежно від характеристик опрацьовуваних даних, за ознаками швидкодинамічності вибір обчислювального процесора визначається тим, як швидко він здатен почати обробляти сигнал та як швидко він може переключитися на виконання іншого завдання.

Розглядаючи згадану ШГКМ як КС критичного застосування, доцільно виділити етапи управління такою мережею: до настання інциденту, під час критичного застосування та після інциденту. В такому разі функції КС при

використання БПЛА у якості вузлів мережі критичного застосування можна визначити за розробленою класифікацією, наведеною на рис. 1.3.

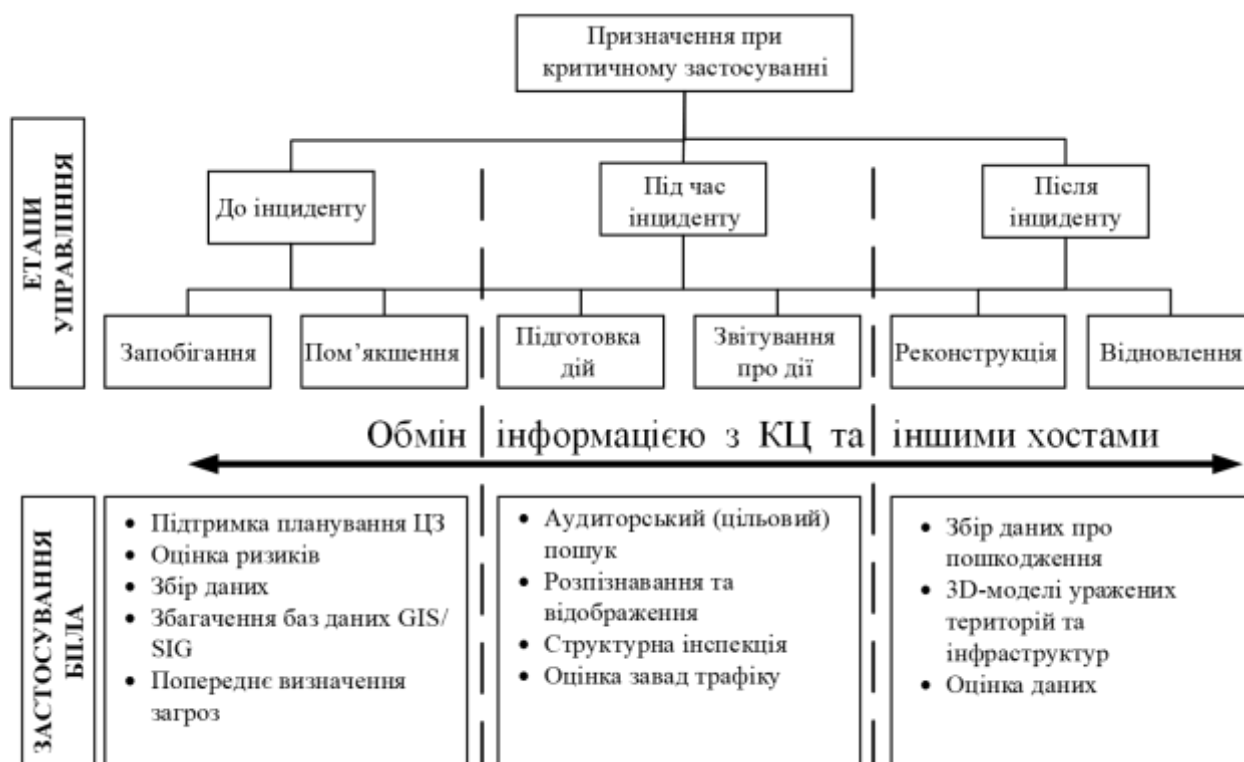


Рисунок 1.3 – Функції комп'ютерної системи при використанні БПЛА у якості вузлів мережі критичного застосування

Для програмно-апаратної реалізації зазначеної КС мають бути використані комп'ютерні компоненти (модулі) БПЛА, розподілені за функціями. Таку класифікацію доцільно розглянути з точки зору моделі взаємодії відкритих систем – або ISO/OSI, або DoD (TCP/IP). Наприклад, за моделлю DoD компоненти (модулі) БПЛА можна розподілити за рівнями, як наведено на рис. 1.4.

Неможливість віддаленого вирішення проблем, які виникають у функціонуванні та технічному обслуговуванні мережевої структури зазначених КФС, потребує переходу від централізованого управління до автономної поведінки БПЛА у разі впливу засобів РЕБ на деякі комп'ютерні компоненти БПЛА [370]. До того ж, необхідно планувати поведінку зграї у разі неможливості

повернення деяких об'єктів ШГКМ при критичному застосуванні. Такий підхід включає опис обмежених можливостей руху в межах визначеної території, можливу дальність комунікації, затримки сигналу, збурення або наявність механічних перешкод. Без врахування швидкодинамічності розглянутих мережевих структур, теоретичні моделі, які переконливо працюють на екранах комп'ютерів, будуть дестабілізуватися в реальних умовах, коли існують затримки, невизначеності та кінематичні обмеження.



Рисунок 1.4 – Класифікація компонентів (модулів) БПА у розподілі за рівнями моделі взаємодії відкритих систем DoD (TCP/IP)

Крім військово-технічних та соціально-економічних питань, пов'язаних як з проведенням розвідки, здійснення патрулювання території, знешкодження живої та неживої сили супротивника, так і з перешкоджанням дорожньому руху, забрудненню територій, технологічних збоїв у роботі одержувачів вантажів, у разі виникнення технічних проблем у таких безпілотних КС, необхідно розглядати й науковий аспект проблеми. Для забезпечення моніторингу на відстані декілька тисяч кілометрів необхідно вирішити проблеми збільшення

відповідного часу енергоживлення комп'ютерних компонентів об'єктів рухомої мережі та її спроможність використовувати для інформаційного обміну з КЦ відкриті канали зв'язку (аеропортів, військового та цивільного транспорту тощо) на території дії такої мережі, незалежно від специфіки країни, де вона використовується.

Таким чином, на сьогодні з'явилася можливість використовувати ШГКМ для вирішення проблем відновлення функціонування модулів безпілотних КС шляхом деталізованого моніторингу вузлів критичного застосування, радіоелектронного блокування таких вузлів, при певних умовах, за рахунок живлення через використання тих же бездротових каналів, за якими здійснюється й передача даних.

Злагодженість дій зграї птахів, рою бджіл та інших комах, риб і стадних тварин використовується при побудові гетерогенних мереж військового, виробничого та дослідницького призначення з непілотованими засобами – БПА – повітряного, наземного, над- та підводного виконання.

Дії «строю» БПА (або інакше «дронів») базуються на «колективному розумі». Саме він забезпечує перестроювання всередині строю, координацію дії під загальним управлінням одного оператора на основі попередньо визначених алгоритмів. В результаті перестроювання строю площа території, на якій БПА можуть виконувати своє призначення, визначається як технічними характеристиками самих дронів, так і порядком (фігурами) побудування БПА у стрій.

Управління може здійснюватися епізодичною подачею команд або безперервно. У таких випадках кажуть, що БПА мають дистанційне, напівавтономне, автономне чи комбіноване управління. Інакше, дрони можуть шикуватись завдяки обміну навігаційною інформацією між собою засобами телекомунікаційних радіо- або оптичним каналів, які утворюються між БПА. В обох випадках, задача побудови системи таких апаратів може бути вирішена за допомогою математичної моделі складної технічної системи з динамічною структурою.

Зміна топології РММ на основі БПА як системи з динамічною структурою суттєво змінює площу, охоплювану строєм. Внаслідок цього необхідно або введення додаткових БПА у стрій, або перегляд подальшого маршруту пересування БПА. Але є об'єктивні труднощі таких додаткових перерахунків, що пов'язані з обмеженою потужністю обчислювача БПА. До того ж, додатковий обсяг обчислень спричиняє більш швидкий розряд акумуляторної батареї на борту БПА й тим самим скорочує час функціонування строю.

На теперішній час найбільш розповсюджені рухомі моніторингові мережі (РММ) з множиною інформаційно-вимірювальних функцій [57, 197, 305]. Цієї множини функцій достатньо лише для контролювання прогнозованих процесів. У разі, коли процес функціонування об'єктів моніторингу є швидкодинамічним, виникає складність адаптації інформаційно-вимірювальної мережі до нових властивостей об'єктів, що підлягають моніторингу. Виникає проблема модифікації топології ШГКМ для вирішення задач моніторингу при просторовому переміщенні [34]. Важливим є також вирішення проблеми розподілення завдань між об'єктами РММ [48, 214]. Проблемність виконання завдань може бути обумовлена обмеженістю обчислювальних потужностей або ресурсів енергозабезпечення компонентів рухомої мережі [34, 103, 215, 263, 299]. Складність полягає у ефективному поєднанні дистанційного управління та автономної поведінки РММ для виконання завдань у динамічному просторі [123, 135, 256].

Відомі методи створення та функціонування РММ мають суттєві недоліки: батарейне живлення рухомих компонентів таких мереж вимагає жорсткого контролю за часом та дальністю функціонування мережі, обмеження трафіка для економії енерговитрат, жорстку траєкторію моніторингу через відсутність інтелектуальних властивостей компонентів інформаційно-вимірювальної мережі [393, 391, 392, 122, 214]. Разом з тим, постійно зростаюча кількість різних об'єктів моніторингу навколишнього середовища, технологічних процесів із застосуванням рухомих мереж, вимагає збільшення довготривалості функціонування та зміни поведінки рухомих компонентів такої мережі адекватно

змінам в оточуючому середовищі [274, 240, 250]. Такий підхід потребує створення нових більш ефективних рішень щодо інтелектуальної або керованої взаємодії об'єктів рухомих мереж.

Результати аналізу досліджень вітчизняних та закордонних вчених засвідчили, що створення рухомих об'єктів ШГКМ необхідно будувати на якісно новому принципі взаємодії КФО з можливістю доповнення режимів роботи віддаленим управлінням через відкриті канали зв'язку [84], із забезпеченням завадостійкості [76, 165, 167, 362] та захисту інформації [260, 291, 316, 324, 326, 361].

1.2 Існуючі підходи вирішення задач управління групою БПА

Виходячи з того, в якому середовищі – детермінованому чи недетермінованому – працює рухома мережа (РМ) з БПА, визначаються два підходи до управління рухомим модулем.

У випадку детермінованого середовища система управління може повністю вирахувати траєкторію руху за уже відомими алгоритмами. Даний підхід базується на тому, що система управління має всю необхідну інформацію про перешкоди у своїй зоні відповідальності, тобто має електронну мапу місцевості, і в змозі побудувати безпечний та оптимальний маршрут слідування. Таке рішення є більш ефективним за рахунок того, що маршрути можуть бути прораховані заздалегідь та не вимагатимуть від РМ постійного корегування маршруту. Від дрона вимагається лише «сліпе» слідування командам центру управління, що в свою чергу зменшує вимоги до апаратного забезпечення самої РМ [384]. В той же час, додатковими умовами для функціонування такої системи є заздалегідь побудована електронна мапа місцевості.

Прикладом досліджень в області групового управління рухомими роботами (надалі – БПА) може служити проект «MARTHA», який виконувався в лабораторії Аналізу системних архітектур Франції [8]. Метою даного проекту було розроблення методів організації групового взаємодії рухомих БПА (від 10 до 100 шт.), призначених для транспортування вантажів в складських терміналах.

В проєкті «MARTHA» використовується централізоване управління групою БПА, при якому планування дій кожного БПА групи здійснюється одним центральним пристроєм управління. Концепція проєкту «MARTHA» полягає в наступному. Система управління групою БПА складається з двох основних частин: центру управління і бортових обчислювачів з комунікаційним модулем (рис. 1.5). Центр управління встановлюється стаціонарно в командному центрі і вирішує завдання планування дій всієї групи БПА. Крім того, центр управління забезпечує зв'язок людини-оператора з кожним БПА групи у разі непередбачених ситуацій, а також використовується для постановки завдання на виконання групою БПА. На борту кожного БПА встановлюється обчислювальний пристрій, який призначений для вирішення завдання руху до зазначеної мети. Контролер зв'язку служить для забезпечення зв'язку БПА з центром управління та з іншими БПА групи.

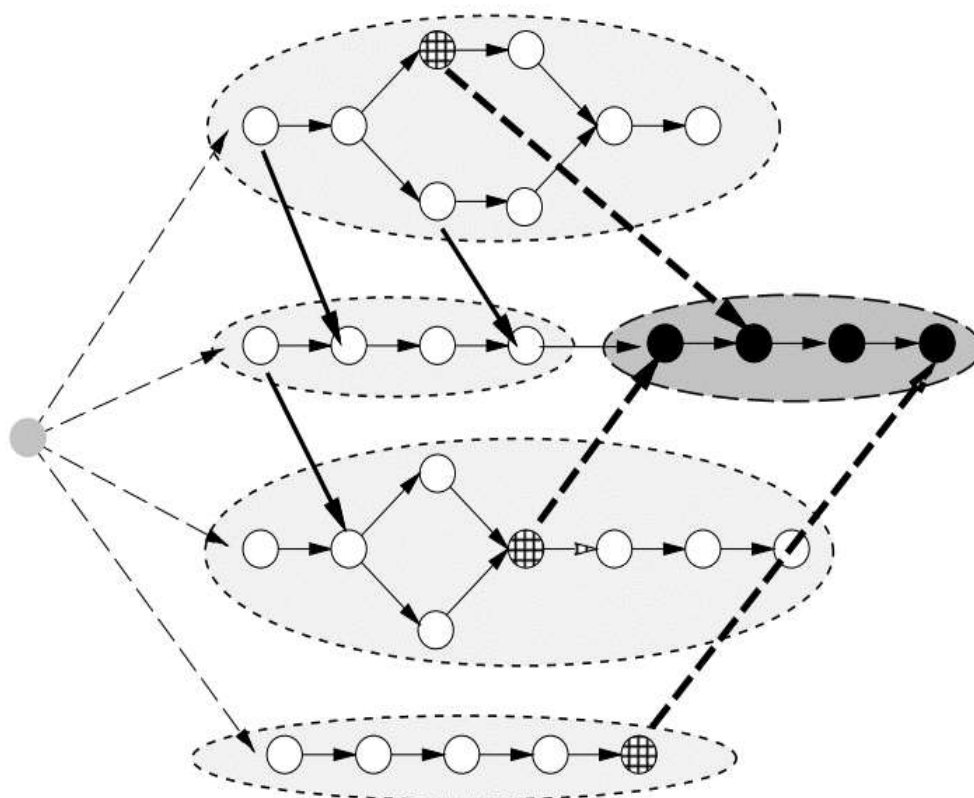


Рисунок 1.5 – Структура мережевої взаємодії транспортувальних БПА у проєкті «MARTHA» (Франція), централізована від КЦ [7]

Військове відомство Російської Федерації (РФ) в квітні 2018 р. прийняло рішення сформувати в складі військово-морського флоту нові полки БПЛА з БПЛА «Форпост» [317]. Перший такий полк вже створений на Північному флоті для боротьби з підводними диверсантами. З 2015 р. ескадрильї БПЛА функціонували на Тихоокеанському, Чорноморському та Північному флотах. З 2011 р. кількість БПЛА в Збройних силах РФ збільшилася більш ніж у 10 разів та налічує біля 2 тисяч дронів у складі 67 рот. Мінімальною групою дронів є безпілотний авіакомплекс (БАК) у складі п'яти БПЛА «Вітязь», випробування яких Міноборони РФ почало у 2017 р. Апарати проводять розвідку, здійснюють наведення на цілі, в режимі онлайн коректують артилерійські й авіаудари, допомагають оцінити втрати, нанесені супротивникові.

Апарат здійснює дистанційно керований з землі політ в автономному режимі або згідно з попередньо заданою програмою, а також здійснює навігацію за підтримки наземного центра управління і диференціальної системи глобального позиціонування. Виконує передачу даних про параметри польоту і стан корисного навантаження на наземний центр управління. БПЛА РФ підтримують постійний зв'язок з наземним центром управління по дубльованим каналам в дуплексному режимі (рис. 1.6).

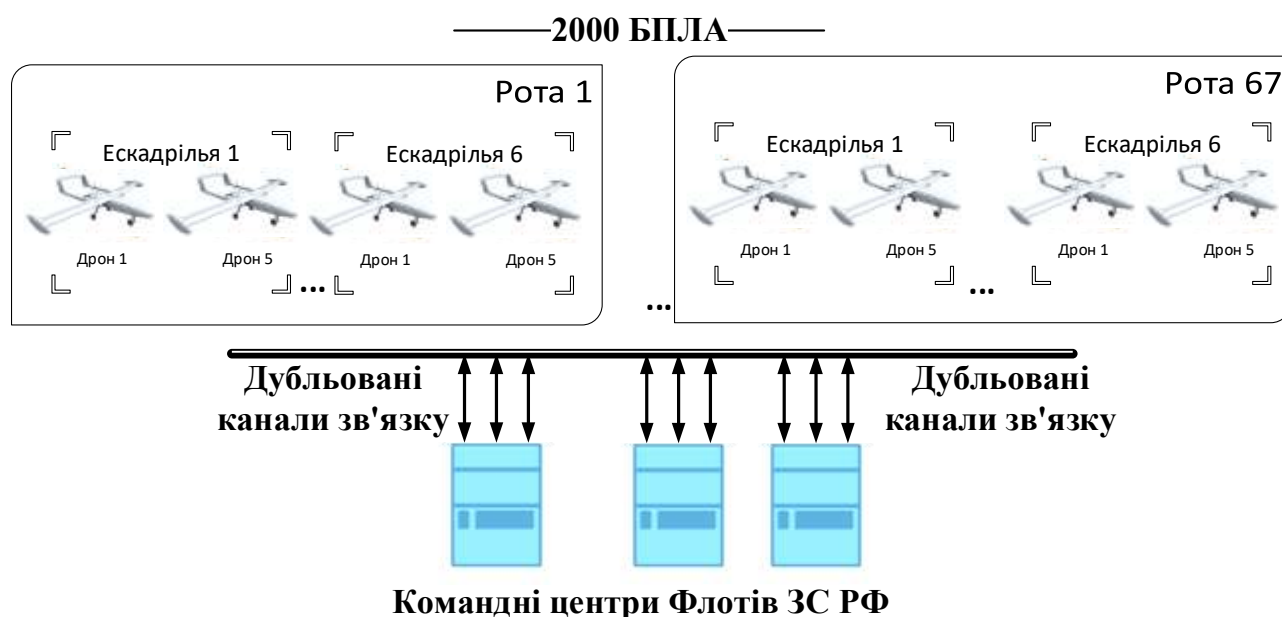


Рисунок 1.6 – Структура мережевої взаємодії БПЛА в розвідувальних проектах РФ, централізована від КЦ

Радіоелектронні системи БПЛА малого класу «Корсар» (РФ) здійснюють передачу на дальні відстані (декілька десятків км) великих масивів інформації [368]. Якщо зазначені вище БПЛА «Форпост» передавали дані лише наземному центру обробки даних (ЦОД, англ. Data Center), то БПЛА «Корсар» використовують для цього інші аналогічні апарати, або гелікоптери, літаки та ін. об'єкти гетерогенних систем. Відпрацьовується також поведінка зазначених БПЛА у критичних ситуаціях, для чого «Корсари» виробляються з композитних матеріалів (що робить їх невидимими для радарів) та комплектовані парашутною системою.

Якщо «Корсар» – це БПЛА літакового типу, то наступною розробкою РФ є БПЛА вертолітного типу – «Катран» з меншими габаритними розмірами та підвісом електронно-оптичної системи (ЕОС) знизу [251, 351].

Тому переважна увага в роботі приділена проблемам, які мають місце при створенні і функціонуванні саме рухомих моніторингових мереж [172].

Метою проекту «AMADEUS», запропонованого японськими дослідниками, є створення групи БПА, що забезпечують підвезення і вивіз виробів для конвеєрних ліній [160]. Використовуються два типи БПА: транспортний робот (ТР), що виконує безпосереднє перевезення виробів, і стаціонарний вантажний робот (СВР), розташований в безпосередній близькості від конвеєрної лінії виконує розвантажувально-навантажувальні роботи з ТР на конвеєр і навпаки. Є безліч ТР і СВР.

ТР переміщуються від одного СВР до іншого СВР по заданому маршруту. Рух здійснюється по одній направляючої лінії в обох напрямках, однак, у разі виникнення перешкоди (у вигляді людини, іншого ТР або іншого об'єкта), ТР повинен зійти з лінії і обійти перешкоду. Коли виникає необхідність підвозу або вивезення виробів з деякою конвеєрної лінії, відповідний СВР видає запит по каналах зв'язку на всі ТР. Вільні ТР надсилають у відповідь свій ідентифікаційний номер і поточні координати. Вільний ТР визначається найближчим СВР, який і передає цьому ТР своє завдання (рис. 1.7). СВР діють незалежно один від одного у виборі того чи іншого ТР.

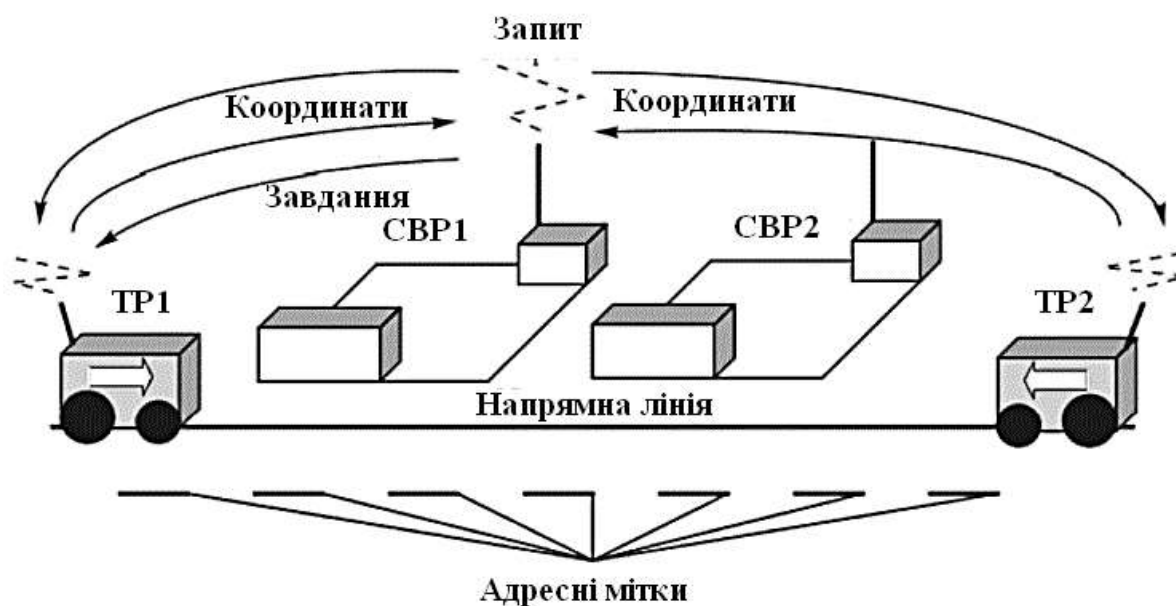


Рисунок 1.7 – Структура мережевої взаємодії транспортувальних БПА в проєкті «AMADEUS» (Японія), централізована в суб-роях [160]

Основною відмінною особливістю проєкту «AMADEUS» є те, що він побудований на основі централізованого управління з розподілом ієрархії, при якому планування дій БПА групи здійснюється кількома пристроями. Дійсно, на відміну від проєкту «MARTHA», в проєкті «AMADEUS» дії TP планують декілька СВР, кожен з яких вибирає з усієї безлічі TP (за певними ознаками) потрібний йому і формує для нього необхідне завдання на виконання деякої дії.

Описані вище групи БПА призначені для використання в стаціонарних, підготовлених середовищах, що дозволяє заздалегідь визначити оптимальні варіанти дій БПА групи, а в процесі функціонування відтворювати відповідні дії залежно від ситуації, що склалася. Проблема групового управління БПА істотно ускладнюється у разі функціонування БПА в заздалегідь невідомому і динамічно змінному середовищі, в якому можуть діяти деякі зовнішні сили, які не залежать від БПА групи.

Максимальна централізовано керована зграя («легіон», «бригада», «група») з 1180 дронів була запущена в грудні 2017 р. у Китаї [33]. Зграя, розбита на 6 суб-роїв («підгруп»), керується лише однією консоллю та одним оператором. Деталізовані команди щодо функцій кожного дрона (позиціонування, колір випромінюваного світла тощо) зашифровані у відповідні

коди. Помилка позиціонування всього батальйону безпілотників вважається не більше 2 см широти і 1 см довготи для кожного пристрою, спираючись на єдину опорну станцію (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Позиціонування дронів у зграї, розподіленої на 6 суб-роїв, спираючись на єдину опорну станцію (Китай)

В той же час, кожен з дронів здатний одночасно регулювати власне положення та маршрут. Якщо ж він втрачає синхронізацію з іншими БПЛА рою і не може піднятися до запрограмованої висоти, дрон повернеться до землі, не перешкоджаючи іншим.

Рішення задачі у недетермінованому середовищі ускладнюється тим, що модулю управління відомо лише про початкові та кінцеві координати, які РММ повинна «відвідати». Всі задачі по розрахунку траєкторії маршруту перекладаються на самих дронів, тим самим ускладнюючи апаратну та програмну частину БПА. Через те, що для проходження певного маршруту дрон повинен сам визначати, чи може він продовжити рух в тому або іншому напрямку, дрон повинен сам побудувати локальну мапу перешкод середовища, в якому він знаходиться, а вже потім рухатись до цілі. Хоча такий алгоритм підвищує автономність кожного елемента групи, в той же час це не вигідно для управління моніторинговими мережами, оскільки призведе до здорожчання кожного окремого елемента мережі, вірогідність втрати якого дуже висока в умовах підвищеного ризику.

Проблеми групового управління БПА, функціонуючих в реальних, заздалегідь невідомих середовищах, присвячено ряд досліджень, проведених в США та Японії.

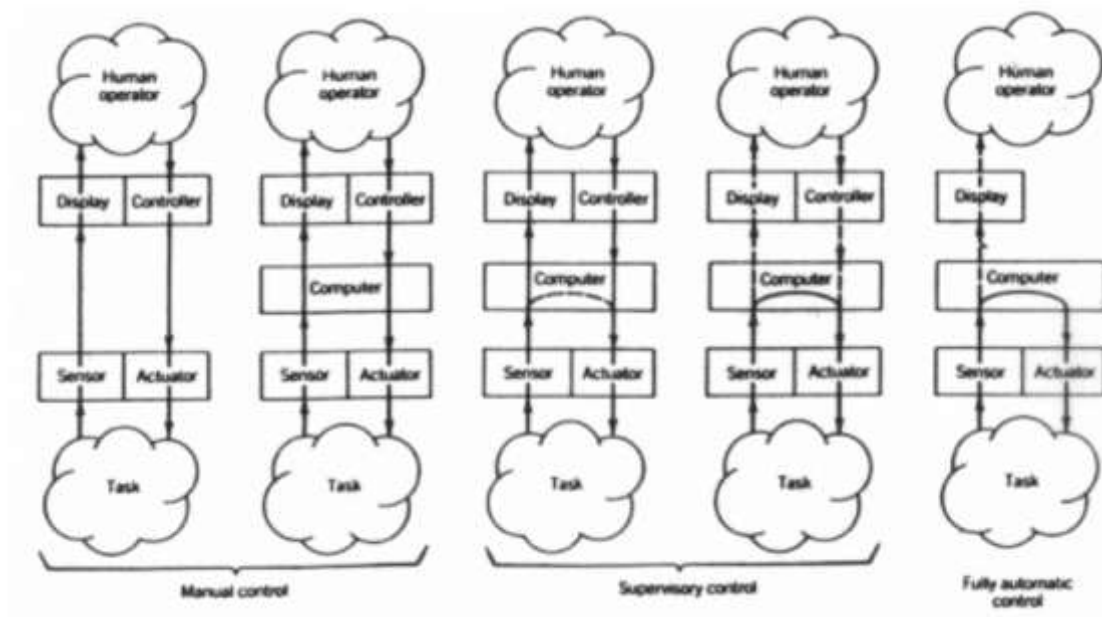
У майбутньому Intel планує збільшити кількість безпілотних літаків у групі до 1500 штук [89].

В Японії дослідження в області систем групової взаємодії БПА активно ведуться в Нагойському (Nagoya) університеті. Тут розроблена система «DARS» (Distributed Autonomous Robotic System), за допомогою якої відпрацьовуються алгоритми та методи планування та управління скоординованими діями групи БПА, що функціонують у природному неорганізованому середовищі, з єдиного мобільного командного центру [53]. Ідея підходу полягає в тому, що кожен БПА може виконувати, наприклад, одну з двох робіт і в процесі функціонування може міняти її на іншу. Спочатку БПА вибирають собі завдання довільно. Періодично, у визначені моменти часу, обмінюючись інформацією з найближчими сусідами, БПА приймають рішення про продовження виконання вибраної ними роботи або про її зміну. Якщо більшість найближчих сусідів виконують ту ж роботу, що і даний БПА, він продовжує її виконання, якщо іншу роботу, то БПА приймає рішення про зміну своєї задачі.

За такою структурою мережева взаємодія БПА в проекті «DARS» (Японія) централізована від КЦ та децентралізована в суб-роях.

Управлінням DARPA Міністерства оборони США також фінансувалось розроблення тактичних мобільних мікророботів для групового застосування в міських умовах, виконувалася в рамках програми «Тактичні мобільні робототехнічні системи» [157]. Дослідження були спрямовані на відпрацювання командної взаємодії групи, що складається з людей і БПА. Система управління дозволяє оператору керувати кількома БПА з єдиного КЦ. Оператор задає ціль для кожного БПА, а ті вже переміщуються до цілей автономно. Дослідження проводилися кількома науковими центрами в рамках таких програм управління DARPA, як «Mobile Autonomous Robot Software» («MARS») і «Tactical Mobile Robots» («TMR»). В даному випадку верхній, найбільш інтелектуальний рівень

управління, на якому здійснюється декомпозиція загального завдання на окремі суб-завдання, реалізується оператором, а дрони лише вирішують їх, адаптуючись до умов середовища (рис. 1.9).



а)



б)

Рисунок 1.9 – Структура мережевої взаємодії БПА в проєктах «MARS» та «TMR» (США): а – централізація задачі від КЦ (а) та автономний шлях кожного БПА; б – вигляд БПА з проєктів [157]

Також, в Лабораторії General Robotics, Automation, Sensing & Perception (GRASP) в Пенсільванському університеті з 2016 р. йде робота щодо розгортання та розвитку безпроводової системи зв'язку та складних алгоритмів пілотування, які визначають конкретні кроки для досягнення такої мети, наприклад, як «Перехід від пункту А до пункту В». Люди не маніпулюють міні-БПЛА в процесі прийняття рішень на низькому рівні. Завдяки просторової роздільності з точністю до декількох міліметрів, система GRASP успішно добилася неймовірно точного позиціонування групи до 20 квадраноторів одночасно у польоті (рис. 1.10) [26].



Рисунок 1.10 – Ланцюгове позиціонування квадраноторів у проекті GRASP [26]

Іншим способом групового управління, що застосовуються для робототехнічних систем, є управління з використанням лідуючого (англ. leader-, master-, mother- й т. п.) пристрою (рис. 1.11). При використанні такого способу групового управління один з БПА є головним (лідуючим) і управляється автономно або дистанційно оператором, а решта БПА є підпорядкованими (англ. Slaves). Вони керуються в режимі стеження за головним або командами, які надходять від головного БПА. Спосіб групового управління «з головним» дозволяє оператору, дистанційно керуючи одним БПА (провідним), фактично керувати цілою групою БПА. У США в даному напрямку працює ряд університетів.



Рисунок 1.11 – Групова взаємодія БПЛА з головним дроном

У Центрі розподілених робототехнічних систем Університету Міннесоти (США) за підтримки управління DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) Міністерства оборони США проводилися дослідження з управління групою БПА, або, що частіше зустрічається в літературі, мультиробототехнічною системою, призначеної для вирішення завдань охорони і спостереження. Група є неоднорідною («гетерогенною») і складається з великого мобільного БПА, званого «Ranger», і декількох мініатюрних БПА, забезпечених різними сенсорними пристроями так званих «Scout» (розвідник). БПА «Ranger» призначений для транспортування, розгортання і спостереження за роботами-розвідниками [22]. При цьому, якщо БПА «Ranger» може функціонувати автономно, то роботи-розвідники не є автономними, а керуються командами, які надходять від БПА «Ranger», бортова система управління якого на підставі інформації про поточну ситуацію визначає ту чи іншу стратегію поведінки роботів-розвідників. У цьому проекті акцент робиться на розроблення програмного забезпечення для центрального пристрою «Ranger», за допомогою якого оператор може керувати роботами-«гантелями» групи в режимі спостереження.

В Пенсільванському університеті в рамках проекту «MARS» (Multiple Autonomous Robots) також були розроблені методи управління рухомою групою

мобільних БПА на основі локальної сенсорної інформації в режимі «головний-підлеглий». Система включає один головний БПА і декілька підлеглих БПА. Методи відпрацьовувалися з використанням двоколісних робото-технічних мобільних платформ Segway RMP і чотириколісних робототехнічних платформ Clodbuster, а також Clodbuster-II і Clodbuster-III [15]. Зокрема, при виконанні проекту відпрацьовувалися методи координації груп мобільних автономних роботів-агентів Clodbuster з використанням правил найближчого сусідства. В основу цих правил покладена теорія пов'язаних систем. Суть методу полягає в тому, що БПА визначають свої дії з дій, виконуваних сусідами. Наприклад, якщо в групі є головний, який рухається запланованою траєкторією, то і всі інші БПА групи будуть виконувати ті самі рухи, що й головний.

В Університеті Карнегі-Меллона розроблена система «GRAMMPS» (Generalized Robotic Autonomous Mobile Mission Planning System), призначена для рішення задач планування дій групи мобільних БПА в неструктурованих середовищах [132]. Розроблення фінансувалася управлінням DARPA.

Наступний напрямок досліджень складають проекти, направлені на розроблення повністю розподілених мобільних мультиробототехнічних систем, керованих децентралізовано.

При моделюванні децентралізованої поведінки членів суб-рою врахований досвід автономної адаптивної системи на основі рою з 103 безпілотників Perdix (Пентагон, 2016), запущених з трьох «материнських літаків» Boeing F/A-18E/F. Мікро-дрони Perdix не є попередньо запрограмованими, вони представляють собою колективний організм, розділяючи один розподілений мозок для прийняття рішень і адаптації один до одного [145].

Так діють рої комах у природі. З огляду на розмір зграї (флоту), безпілотниками неможливо управляти з єдиного КЦ кожним окремо. Оскільки кожен Perdix спілкується і співпрацює з усіма іншими апаратами, рій не має лідера і може плавно адаптуватися до будь-яких змін в команді. Але рій отримує централізовані команди загального призначення від людини-оператора, після чого виконує їх найбільш оптимальним способом.

1.3 Способи обміну інформацією між об'єктами моніторингових мереж

Узагальнена модель взаємодії групи дронів показана на рис. 1.12, за якою БПЛА спілкуються один з одним. У деяких випадках, глобальне позиціонування або центральні команди посилаються з КЦ, але згряя все одно повинна бути в змозі виконати поставлене завдання при блокуванні комунікації з КЦ.

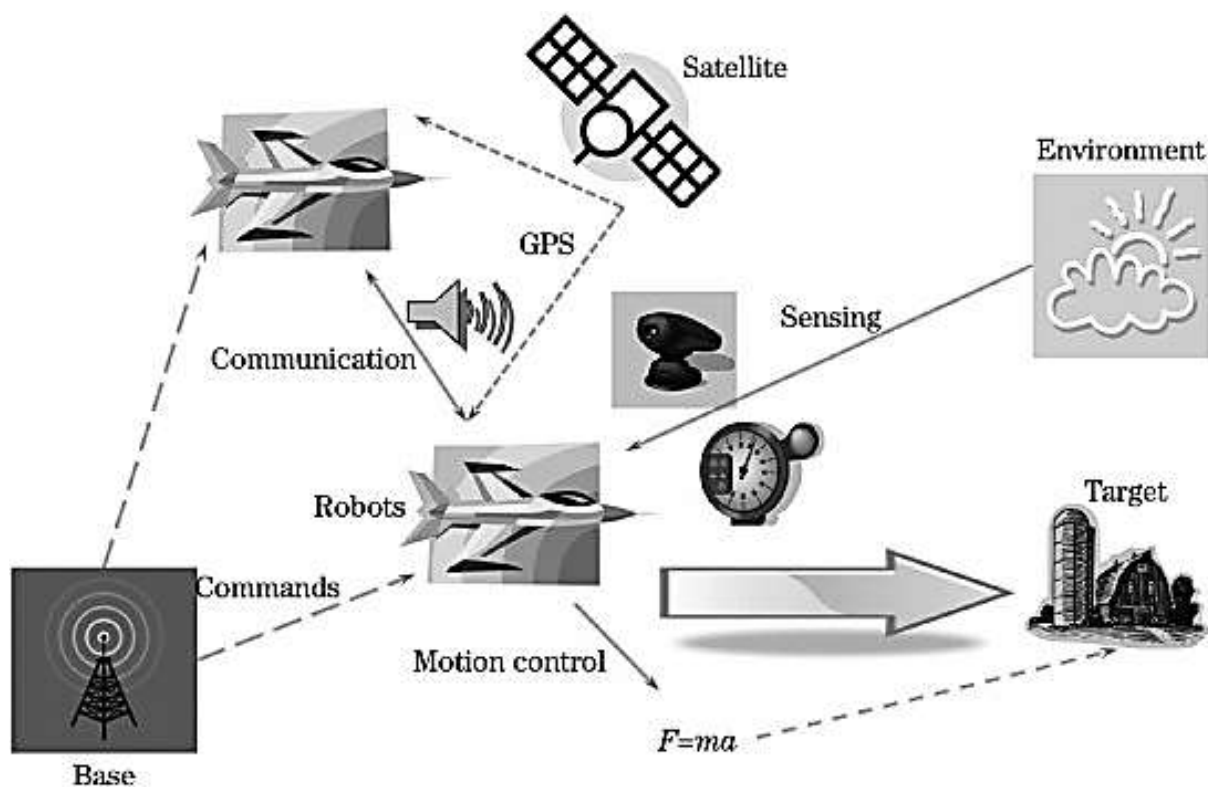


Рисунок 1.12 – Загальна модель групи дронів [187]

У більшості робіт дослідницького характеру групи БПЛА класифікуються як «рої дронів», враховуючи їх колективну поведінку. Але, з урахуванням сучасних тенденцій розвитку галузей, в яких застосовуються БПЛА, доцільно розділяти згряю на суб-рої, зважаючи, різні БПЛА виконують різні завдання. Об'єкти, що мають виконувати однакові (споріднені) завдання, – наприклад, вимірювання метеоданих, – є сенс узагальнювати за ієрархією у «суб-рій», всі суб-рої за макро-задачею поєднуються у «згряю».

Тому, щоб не змінювати в аналізі авторську нотацію, розуміється під авторським терміном «рій» в огляді літератури укрупнену, не розбиту на

«суб-рої», групу БПЛА (дронів), яка у наступних (дослідницьких) розділах вже буде іменуватися «зграєю».

Обмін інформацією є необхідним, коли БПЛА співпрацюватиме один з одним, тому модуль обміну інформацією є основним компонентом для управління поведінкою рою. Основні функції об'єктів, що беруть участь у такій взаємодії, обмежені зв'язком типу «Peer-to-Peer» (однорангова мережа).

Взаємодія об'єктів зграї у гетерогенній мережі є найбільш поширеним видом спілкування, та їх поведінка може бути описана на подоби біологічним об'єктам [22]. Такий механізм зі зворотнім зв'язком допоможе оптимізувати поведінку дронів.

Існує три способи обміну інформацією в зграї: прямий зв'язок, зв'язок через середовище і сенсорний [19]. Більш ніж один тип взаємодії може використовуватись в одному рої, наприклад, кожен дрон сприймає навколишнє середовище та зв'язується з сусідами. Balch розглядав вплив трьох видів комунікацій в рою [19]. В роботі поставлено три завдання і виконане порівняння продуктивності при моделюванні. Деякі дослідники також обговорювали можливість рою взаємодіяти без комунікації. Однак, зв'язок і сенсорювання може дійсно підвищити ефективність рою для більшості випадків.

Прямий зв'язок аналогічний зв'язку об'єктів (вузлів) бездротової мережі і також складається з двох типів: однорангова мережа і трансляція. Завдяки розвитку мобільних пристроїв можна відразу прийняти декілька існуючих технологій з використанням IEEE 802.11b, Bluetooth та ін. бездротових стандартів зв'язку. Проте, бездротові датчики коштують майже половину загальної ціни БПЛА. Іншим недоліком такої схеми є те, що необхідна пропускна здатність каналу зв'язку буде експоненціально зростати при зростанні популяції рою. Таким чином, прямий зв'язок у рої або зграї має бути обмежений, наприклад, національним регулятором (FAA США, Державною авіаційною адміністрацією України тощо) або компанією, яка є власником дронів та інтегрує їх у національну повітряну систему (рис. 1.13).

Навколишнє середовище може виступати в якості посередника для взаємодії дронів. Дрони можуть залишають свої сліди, скидаючи «маркери» в навколишньому середовищі після певної дії, щоб інформувати інші БПЛА, які можуть зчитати «слід» без безпосередньої комунікації між іншими об'єктами рою. Таким чином, подальші дії, як правило, підсилюються і спираються один на одного, що призводить до спонтанної появи діяльності на рівні рою. Рій імітує поведінку мурах або бджіл і взаємодіє за допомогою «віртуальних феромонів». Така інтерактивна схема уникає експоненціального зростання кількості зв'язків між БПЛА, але має деякі обмеження на навколишнє середовище, щоб підтримати «віртуальні феромони».

Дрони можуть відчувати інші БПЛА і предмети у середовищі поблизу завдяки використанню бортових датчиків, які можуть розрізняти БПЛА та інші об'єкти навколишнього середовища. БПЛА зчитують об'єкти або цілі в навколишньому середовищі і виконують певні дії, такі як ухилення від механічних перешкод, цільовий пошук й т. і. [103]. Основна проблема цієї схеми в тому, як інтегрувати всі датчики в рій ефективно для співпраці. Cortes та ін. досліджували, як управляти і координувати групу автономних транспортних засобів, що розглядаються в якості агентів з датчиками, в адаптивний, розподілений і асинхронний спосіб [41].

Основна відмінність між комунікацією і зондуванням є те, чи індивіди відправляють повідомлення активно, чи приймають повідомлення пасивно. Хоча більш точне спілкування вимагає більш складних апаратних засобів і синхронізації, пропускну здатність, енергія та час виросте дуже швидко разом з популяцією рою. Кооперативна модель роботизованої групи повинна спробувати спростити спосіб комунікації і використовувати зондування настільки, наскільки це можливо без зв'язку. В деяких завданнях БПА в межах суб-рою можуть обмінюватися всією інформацією лише за допомогою датчиків.

1.4 Моделі поведінки об'єктів рою

Розподіл завдань і навчання в даному випадку є досить важливим для рою БПЛА. Задача розкладання і призначення може значно підвищити ефективність особливо складних завдань. Kalra та Martinoli порівняли витрати і користь від різних типів завдань на розподіл [86]. Навчання також корисно, так як параметри системи управління важко оновлювати. За допомогою самоадаптаційного навчання і методів оптимізації рій показує кращу пристосовність в різних середовищах. Li та ін. обговорили проблему використання різних методів навчання в рої та порівняли їх продуктивність на симуляторі [104]. Zhang та ін. застосували еволюційну нейронну мережу для розвитку управління роєм і використовували цей метод у проблемі огляду структури рою [198].

Сучасні методи створення груп БПЛА вимагають використання комплексних (узагальнених) критеріїв, впроваджених математичних моделей у процес оптимізації параметрів компонентів БПЛА. Такі моделі повинні імітувати функціонування БПЛА (суб-рою, зграї) при виконання свого завдання.

Детальному аналізу підлягають питання безпеки та технічні чинники, що можуть перешкодити дрону виконати завдання:

- температура більш ніж 40°C влітку та нижче ніж мінус 20°C взимку (при якій непрацездатне комп'ютерне, механічне, та вимірювальне обладнання);
- висока швидкість вітру (та іноді піщані бурі), яка здатна змінити курс безпілота;
- високий ступінь електромагнітного випромінювання, при якому БПЛА стає некерованим, тощо.

Крім вирішення питань управління такими поодинокими дронами (флотом), необхідно приділити увагу таким питанням, як використання системою безпеки для захисту дронів та їх вантажу різних біометричних даних адресатів (відбитків пальців, розпізнавання очей та ін.). Потрібно також прийняти рішення (створити алгоритм поведінки дрона), які дії повинен вчинити БПЛА з вмістом носимого контейнера (модуля пам'яті) у разі захоплення дрона сторонніми

особами: запустити механізм знищення контейнера, здійснити ураження загарбника або ін.

Моделювання використовується в багатьох областях дослідження, щоб краще зрозуміти внутрішню структуру системи. Моделювання допомагає рою, оскільки рій повинен бути масштабованим до декілька сотень та тисяч БПЛА. Час і гроші обмежені для таких масштабних експериментів, експерименти можуть виконуватись лише з поодинокими дронами.

З огляду на характеристики групи дронів, методи моделювання діляться на чотири типи [187, 383]:

- на основі датчиків;
- мікроскопічне моделювання;
- макроскопічне моделювання;
- моделювання на основі інтелекту.

В першому випадку датчики і пристрої БПЛА змодельовані як основні компоненти системи разом з об'єктами в середовищі. Тоді взаємодії між БПЛА моделюються як реалістичні і прості, наскільки це можливо. Цей метод моделювання є найпопулярнішим та найстарішим, що використовується для експерименту з роботизованими системами.

Попередні дослідження з використанням методів моделювання на основі датчиків не враховували реальні фізичні обмеження [88], але тепер дослідники ввели реальні фізичні закони в моделі [198].

У мікроскопічному моделюванні БПЛА і взаємодії моделюються як кінцеві автомати. Поведінка кожного БПЛА визначається як певна кількість станів, і умови передачі даних засновані на вхідних даних від системи телекомунікацій і сенсорів. Оскільки модель заснована на поведінці кожного БПЛА, моделювання повинно бути запущено декілька разів, щоб отримати середній результат поведінки рою.

У більшості досліджень ймовірна мікроскопічна модель використовується з тих пір, як шум був змодельований як ймовірність в моделі. У ймовірній мікроскопічній моделі ймовірності оцінюються в залежності від експериментів з

реальними БПЛА, і модель повторює цю ймовірність в симуляції, щоб передбачити поведінку рою [18].

Макроскопічне моделювання являє собою метод моделювання, протилежний мікроскопічному моделюванню. У макроскопічному моделюванні стан системи являє собою середню кількість БПЛА в певний проміжок часу.

Основною відмінністю між мікроскопічним і макроскопічним моделюванням є рівень деталізації моделей. Мікроскопічна модель використовується для симуляції на індивідуальному рівні та на рівні групи, в той час як макроскопічна модель імітує поведінку на рівні рою. Мікроскопічна модель перебирає поведінку рою, а макроскопічна модель може видавати одразу кінцевий стан рою. Таким чином, макроскопічна модель може мати глобальний погляд на рій, в той час як мікроскопічна модель може показувати деталі поведінки рою [315].

Макроскопічні ймовірнісні моделі також широко використовуються дослідниками. Martinoli та ін. застосували макроскопічне моделювання, щоб вирішити проблему розширення з базової моделі, яка містить лише два стани, до моделі з усіма станами [44]. Вони також порівняли мікроскопічну, макроскопічну і модель на основі датчиків і описали недоліки макроскопічної моделі.

Спільні схеми з алгоритмів інтелектуального рою були введені в рій робототехніки в багатьох дослідженнях. Оскільки БПЛА використовують ті ж або аналогічні схеми з цими алгоритмами, моделі та інші методи можуть бути використані також для роїв та зграй БПЛА.

Найбільш часто використовуваним алгоритмом на основі інтелекту є метод рою часток (МРЧ), який імітує процес скупчення птахів. Це метод числової оптимізації, для використання якого не потрібно знати точного градієнта оптимізованої функції. Метод рою часток був доведений Кеннеді, Еберхартом та Ші та спочатку призначався для імітації соціальної поведінки [97, 98]. Алгоритм був спрощений, і було зауважено, що він придатний для виконання оптимізації. Книга Кеннеді й Еберхарта описує багато філософських аспектів методу рою часток і так званого ройового інтелекту [98].

Крім методу рою часток, дослідники також ввели інший ройові алгоритми пошуку. Багато успішних моделей рою були створені з огляду на поведінку колоній мурашок. Ці підходи забезпечують ефективні евристичні алгоритми для пошуку в динамічному середовищі [171, 206] і для маршрутизації [198, 201].

Існує ще багато проблем, коли представляють групу дронів з інтелектом рою. Схеми в цих алгоритмах розглядають найбільш глобальні взаємодії і вводять велику кількість випадкових ходів для більш непередбачуваних результатів. Проте, ці операції будуть недоступні для суб-роїв БПЛА, зважаючи на окрему специфіку їхніх завдань. Тому необхідно розробляти алгоритми поведінки окремих суб-роїв з урахуванням унікальності, масштабованості й гнучкості виконуваних ними завдань у складі зграї.

Більшість розглянутих положень також можуть бути поширені на БПА, які пересуваються не тільки у повітряному середовищі.

1.5 Аналіз існуючих апаратно-програмних систем для вирішення задачі управління БПЛА

Основу поведінки членів рою включає в себе функції, забезпечені модулем управління (автопілот). Тоді об'єкти рою можуть менше покладатися на прямий зв'язок один з одним. Рій може поліпшити продуктивність з меншим обміном інформацією і високою масштабованістю.

БПЛА в комплексній системі рою можуть мати додаткові функції, включаючи, задачі декомпозиції, розподіл завдань, адаптивне навчання і т. д. [170]. БПЛА за допомогою цих функцій в апаратній частині можуть спростити структуру алгоритму руху для створення більш складної фізичної конструкції дронів. БПЛА можуть також виконувати аналогічні функції з ретельно сконструйованими кооперативними алгоритмами. Реалізація таких функцій в апаратному або програмному забезпеченні залежить від фізичної конструкції БПЛА, контролерів та датчиків, найкращого використання їх комп'ютерних компонентів [103].

Апаратною основою будь-якого БПЛА є польотний контролер, який акумулює дані з датчиків, управляє стабілізацією і положенням в просторі. Команди польотному контролеру можуть відправлятися з пульта або з наземної станції (Ground Station). В результаті змінюються обороти двигунів, що дозволяє БПЛА переміщатися в повітрі. Використання бортового міні-комп'ютера з підключенням безпосередньо до польотного контролеру поєднує в собі переваги ручного пульта і наземної станції, дозволяє автоматизувати політ і взаємодіяти із зовнішнім світом, використовуючи виміряні параметри навколишнього середовища для здійснення автономного польоту.

Для розроблення у подальшому методів та алгоритмів створення та функціонування суб-роїв у складі зграї БПЛА необхідно сформулювати вимоги до наявності електронних компонентів та програмних функцій, які реалізовані компаніями-виробниками на борту БПЛА. Основні критерії до автопілоту можна згрупувати за трьома типами вимог.

Обов'язкові:

1. Функція Return-to-Home (RTH), що зекономить обчислювальні потужності для повернення до точки старту при визначеному рівні розрядки батарей.
2. Функція «Круїз контроль» для утримання висоти польоту або висоти і курсу польоту.
3. Функція «On Screen Display» (OSD), яка надає відображати поточні координати та інші польотні параметри, дрона поверх зображення з камери.
4. Показання напруги з усіх батарей, що дозволить коригувати час виконання завдання дроном в залежності від залишкової напруги.
5. Показання абсолютної швидкості, що дозволить планувати розмір площі для обстеження.
6. Показання висоти (наявність альтиметра на борту), що надає можливість врахувати особливості рельєфу при прокладанні маршруту.
7. Показання відстані до точки зльоту.

8. Компас для забезпечення траєкторії польоту відповідно до прокладеного теоретичного маршруту.

9. GPS-трекер для точного визначення місцезнаходження БПЛА.

Додаткові:

1. Показання температури за бортом, що дозволить діагностувати критичне застосування БПЛА відповідно до параметрів працездатності електронного обладнання дрона (в межах мінус 20°C + 40°C).

2. Показання відносної швидкості, що дозволить розробляти алгоритми функціонування зграї при відсутності GPS-координат.

3. Функції контролю периметра, що зекономить обчислювальні потужності для повернення до точки старту при перетині кордону.

4. Стабілізація при відносно сильних вібраціях (при віражах та на швидкості більше 90 км/год), що зекономить обчислювальні потужності для компенсації «ефекту желе» на зображеннях.

Необхідні для здійснення керованого польоту:

1. Передача координат в реальному часі (з відображенням положення дрона на Google- або Apple-мапі).

2. Можливість підключення антени для збільшення дальності польоту за межі прямої видимості оператором (більше ніж 5 км).

Спираючись на технічні характеристики наявних апаратних рішень, при виборі компонентів БПЛА особливу увагу треба приділити вибору автопілоту, який повинен бути оснащеним комплектом необхідних сенсорів, мати можливість встановлення польотних точок та редагування маршруту в польоті, мати відкритий вихідний код програмного забезпечення (ПЗ) та відкритий протокол обміну даними, підтримувати встановлення на різні типи БПЛА.

Порівняння функцій автопілотів різних виробників наведено у додатку А.1.

Перевагу у виборі автопілотів БПЛА мають критерії, які забезпечують здатність функціонувати у складі зграї у складних недетермінованих умовах, а

саме: використання сервісів Google, управління декількома дронами одночасно, вибір точок маршруту на мапі, комунікацію під час польоту.

З більшості розглянутих, описаний комплект сенсорів з апаратних рішень компанії DJI спільно з набором із засобів розроблення, утиліт і документації SDK (Software Development Kit) надають більше можливостей для розроблення алгоритмів функціонування БПЛА у складі суб-роїв та зграй в автономному режимі польоту. Необхідно зауважити, що SDK підтримує як IOS, так і Android.

Підсумовуючи вищенаведене, можна надати перевагу апаратно-програмним компонентам фірми DJI. Вагомим підґрунтям для цього є те, що DJI надала доступ до пакету засобів розробки (SDK) для своїх квадрокоптерів серії Phantom. Використовуючи SDK, розробники ПЗ, включаючи PixiePath, Pix4D, Drone Deploy, Bright Sky Labs, Field of View і Skyward.io, вже почали створювати програмні застосунки, які дозволяють пілотам DJI Phantom редагувати і обмінюватися відео на мобільних пристроях, створювати 3D-мапи, забезпечуючи польоти з дотриманням правил і керуючи кількома польотами одночасно. Слід зазначити, що разом з випуском нових моделей дронів версії SDK повинні оновлюватись.

Зважаючи на постійне доповнення функціоналу дронів, існуючі розробки з відкритим кодом доцільно розширяти шляхом створення власного ПЗ для реалізації додаткових сервісів у функціонуванні зграї БПЛА.

1.6 Планування маршрутів РММ

Велика кількість факторів, які впливають на вибір шляху пересування БПЛА та велика кількість вимог, пов'язаних з державним регулюванням можливих шляхів пересування БПЛА, роблять цю проблему дуже складною [152, 177, 360]. Отже однією з головних задач є необхідність знайти оптимальне рішення, яке буде дешевим, але також буде виконувати велику кількість визначених умов. Підвищення якості планування маршрутів для БПЛА можливе за рахунок оцінювання ситуаційних ризиків, що надає можливість збільшувати ефективність використання БПЛА приблизно на 10–12 % [245]. Невирішеною проблемою

залишається те, що складові критеріїв прийняття рішення можуть часто суперечити одна одній, тому виникає необхідність в їхньому балансуванні.

Фактори, що можуть вплинути на остаточне рішення щодо прокладання маршруту, дуже різноманітні і можуть варіюватися в конкретних випадках (структура рельєфу, метеоумови, наявність та зайнятість інших повітряних транспортних коридорів, економічні та соціальні аспекти і т. д.). Тому йдеться про формування не оптимального, а суб-оптимального маршруту, який передбачає обліт всіх попередньо заданих на мапі точок маршруту з урахуванням заряду акумулятора.

Через вплив великої кількості факторів, умов і вимог, процес прийняття рішень доцільно виконувати за допомогою нейронної мережі. Моделювання поведінки БПЛА на основі нейронних мереж є альтернативою іншим видам моделюванням на основі математичних методів, тому що їх результати схожі. Проте, нейронні мережі швидше працюють і не вимагають великих обчислювальних потужностей або складних обчислень. На перший погляд, головний недолік полягає в потребі мати окремі нейронні мережі для кожного етапу польоту, як зазначено раніше. Але математичні моделі також є специфічними для кожного з етапів, та одне з можливих рішень цієї проблеми може бути використане для іншої нейронної мережі, яка активує певну мережу в відповідний момент. В цілому, моделі ідентифікації використовують орієнтацію у просторі XYZ, щоб моделювати систему БПЛА.

Для формування просторових коридорів пересування БПЛА існує позитивний досвід використання нейронної мережі Хопфілда (НМХ) [86, 105, 285, 335].

Основна проблема при маршрутизації полягає в тому щоб знайти найкоротший шлях між двома точками (А і В). Математично кажучи, це евклідова відстань, яка є прямою лінією траєкторії (рис. 1.14, а). У реалістичних умовах зайняті транспортні коридори (або заборонені державним регулюванням для пересування БПЛА) вводять обмеження, і найкоротша відстань визначається мінімальною сумою індивідуальної довжини відрізків, що з'єднують точку А з

точкою В (рис. 1.14, б). Розв'язок цієї проблеми може бути знайденим за допомогою алгоритмів пошуку на графах (алгоритму двонаправленого пошуку, пошуку в ширину, пошуку в глибину й т. п.). Одним з найбільш пристосованим для легкої програмної реалізації є алгоритм Дейкстри [213], правомірність використання якого забезпечена відсутністю в задачі ребер від'ємної довжини.

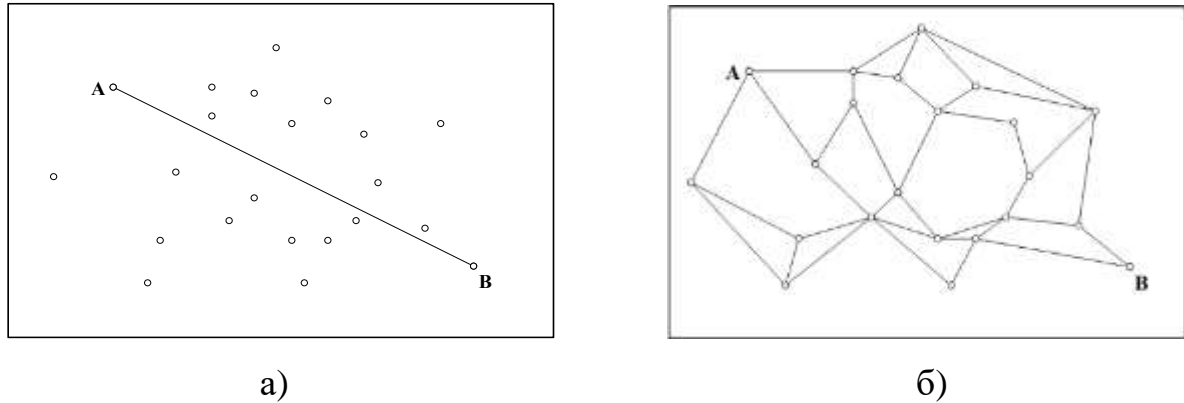


Рисунок 1.14 – Найкоротша відстань між точками А і В: а – в ідеалі, б – в реалістичних умовах інфраструктурної мережі

У разі, якщо знадобиться розробити новий шлях серед існуючої інфраструктури (тобто повітряних транспортних коридорів, що вже використовуються), необхідно проаналізувати всі фактори, які можуть на це вплинути. Навіть, якщо існує лише один фактор, який є реалістичним і просторово орієнтованим, відстань між двома точками повинна бути параметрично обґрунтованою. Це особливо важливо у випадку, коли спостерігаються чинники, що можуть приймати різні значення в різних просторових зонах (рис. 1.15).

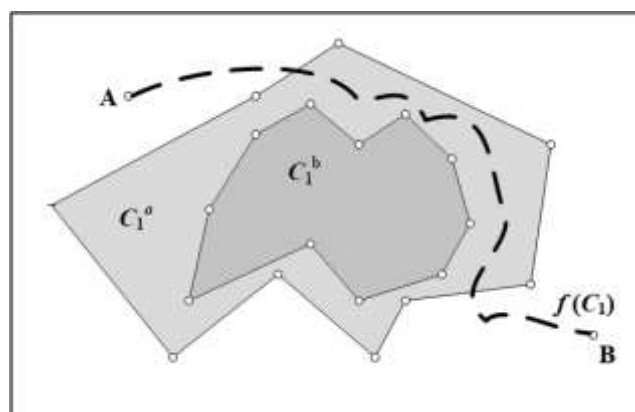


Рисунок 1.15 – Найкоротша можлива відстань між точками А і В, коли фактор має два можливих значення – C_1^a й C_1^b

Наприклад, якщо просторова зона C_1 розташована між точками А і В, з двома різними кількісними областями (C_1^a та C_1^b), то відстань між точками залежить від одиниці вартості побудови маршруту через області C_1^a та C_1^b . Проблема вибору в даному випадку залежить від співвідношення ціни та довжини. У разі, коли загальна вартість побудови маршруту через C_1^b значно більша, ніж загальна вартість поза цією областю, оптимальним рішенням був би обхід навколо цієї області, що дозволило б зробити маршрут довшим, але безпечнішим або дешевшим. Проблема вибору маршруту масштабується при аналізі великої кількості можливих чинників, особливо, коли кожен фактор може мати свої власні складові (рис. 1.16).

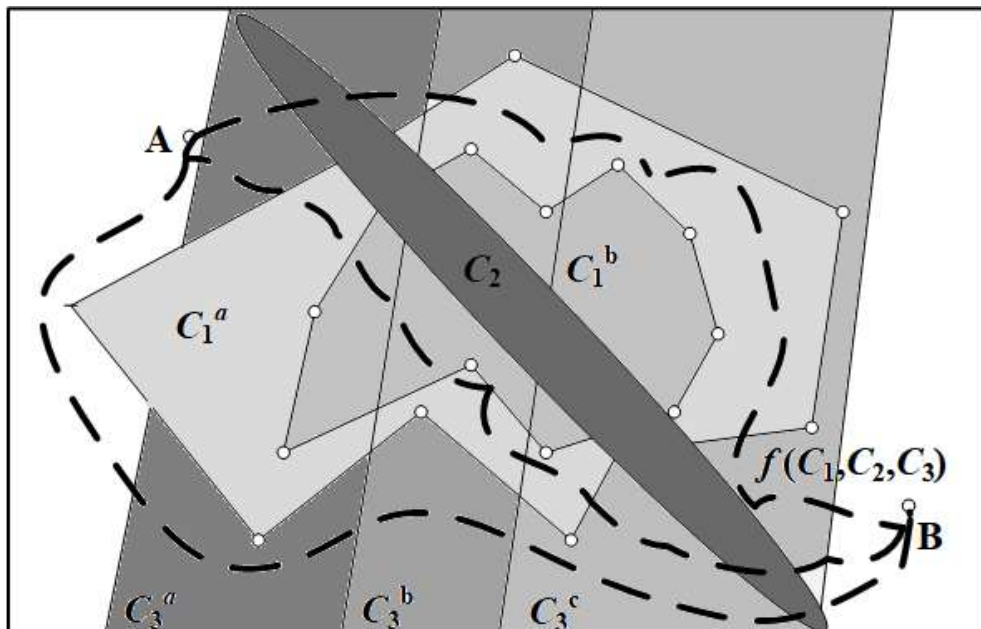


Рисунок 1.16 – Найкоротша можлива відстань між точками А і В при аналізі великої кількості можливих чинників

Найкоротша можлива відстань між точками А і В (рис. 1.12) в просторових зонах C_1 , C_2 та C_3 . C_1 має два можливих значення (C_1^a та C_1^b), C_2 – одне можливе значення, а C_3 має три можливих значення (C_3^a , C_3^b та C_3^c).

Запропонований Коїс та Релїн алгоритм прокладання оптимального шляху складається з трьох етапів [105]: моделювання рельєфу місцевості, управління (закладені умови, вимоги і параметри нейронної мережі) і обробка даних (блок-схема представлена на рис. 1.17).



Рисунок 1.17 – Блок-схема алгоритму, запропонованого Kojic та Reljin

Методика складання мапи місцевості включає в себе розподілення віртуальної мережі по географічній мапі регіону. Мапа може бути розроблена з довільними розмірами квадрата форми $r \times r$. При виборі великих значень параметра r , результуючі регіони мають менші розміри і рішення виходить більш точним. Така область є найменшою формою, із якою може працювати алгоритм, і розроблене рішення може бути використано для ряду регіонів та географічних ділянок, що пропонуються для прокладання шляху.

Управління включає в себе визначення всіх умов і вимог, обмежень та параметрів запропонованої нейронної мережі, що можуть вплинути на кінцевий результат, його точність, швидкість запропонованого алгоритму і т. д. Цей етап також включає до себе визначення параметрів, необхідних для роботи алгоритму і умов, передбачених в реальному середовищі. Наприклад, дані обмеження

можуть бути пов'язаними із детермінацією чіткої умови: чи може маршрут проходити через певне місто чи район, або більш ефективним рішенням буде обхід даної географічної зони.

На етапі аналізу і обробки всі дані з попередніх двох фаз використовується для створення штучної нейронної мережі. Заради потреб даного алгоритму, було розроблено чітко визначену, особливу логіку, засновану на нейронній мережі. Завдання нейронної мережі в цьому алгоритмі – обробка всіх даних і пропонування суб-оптимального рішення, яке враховує всі дані, що подаються на вхід.

Для виконання зазначеного завдання зі всієї безлічі нейронних мереж доцільно використовувати рекурентні нейронні мережі з використанням зворотних зв'язків, завдяки чому стан мережі в кожний момент часу залежить від попереднього стану. Наявність зворотного зв'язку дозволяє реалізувати систему, що має асоціативну пам'ять. Найбільш відомими архітектурою рекурентних нейронних мереж є мережі Хопфілда, мережі Коско, мережі Джордана і мережі Елмана.

НМХ представляє собою одношарову мережу із зворотними зв'язками, що належить до класу т. з. релаксаційних нейронних мереж.

В основі функціонування НМХ лежить ітеративний принцип роботи. На кожній ітерації відбувається обробка результатів, отриманих на попередньому кроку. Циркуляція інформації в НМХ відбувається до тих пір, поки не встановлено рівновагу, тобто, значення її виходів перестануть змінюватись. На відміну від багатьох нейронних мереж, що працюють до отримання відповіді через певну кількість тактів, НМХ працює до досягнення рівноваги, коли наступний стан мережі дорівнює попередньому.

В найчастіше вживаному асинхронному режимі роботи НМХ стани нейронів в наступний момент часу змінюються послідовно: обчислюється локальне поле для першого нейрона в момент t , визначається його реакція, і нейрон встановлюється в новий стан (яке відповідає його виходу в момент $t + 1$), потім обчислюється локальне поле для другого нейрона з урахуванням нового стану

першого, змінюється стан другого нейрона, і т. д. Стан кожного наступного нейрона обчислюється з урахуванням всіх змін станів нейронів, розглянутих раніше.

Але, таких режим є дуже неекономним, тому що для того, щоб розрахувати стан нейрона № 2, потрібно знати оновлений стан нейрона № 1 і старий стан нейрона № 3, та помножити їх на ваги w_{13} та w_{23} [315, 388]. Тобто, три нейрона породжують систему з вісьма станами. Такий механізм потребує два додаткових такти, тобто, два додаткових сеанси зв'язку між БПЛА.

Тому в роботі передбачається використовувати синхронний режим, при якому послідовно проглядаються нейрони, однак їх стан запам'ятовується окремо, незалежно один від одного, і не змінюються до тих пір, поки не будуть пройдені всі нейрони мережі. Коли все нейрони переглянуті, їх стани одночасно (тобто синхронно, за назвою режиму) змінюються на нові. Таким чином, досягається моделювання паралельної роботи послідовним алгоритмом.

Основними перевагами НМХ для задач даної роботи:

- невимогливість до обчислювальних ресурсів завдяки одношаровості архітектури НМХ (кількість нейронів визначає кількість входів та виходів мережі);

- висока швидкодія, оскільки нейронна мережа утворює систему паралельної дії, і нейрони в мережі сприймають вхідну інформацію одночасно.

Таким чином, мета НМХ полягає в тому, щоб отримати математичне представлення оптимального рішення для прокладання маршруту відносно географічної ділянки, що розглядається. Як результат, ця фаза дає на виході матрицю V розмірністю $r \times r$, заповнену значеннями «0» або «1». Значення «1» вказує на те, що дану точку маршруту розглянуто, в той час як «0» вказує на протилежне.

Якщо на вхід асоціативної пам'яті, побудованої на основі НМХ, подається карта з нанесеними 10×30 точками, то розмірність мережі $10 \times 30 = 300$ нейронів. У загальному випадку система з n нейронами має 2^n різних станів і подається n -вимірним гіперкубом.

Для моделювання Коїс та Reljin використали НМХ, структуру якої зображено на рис. 1.18.

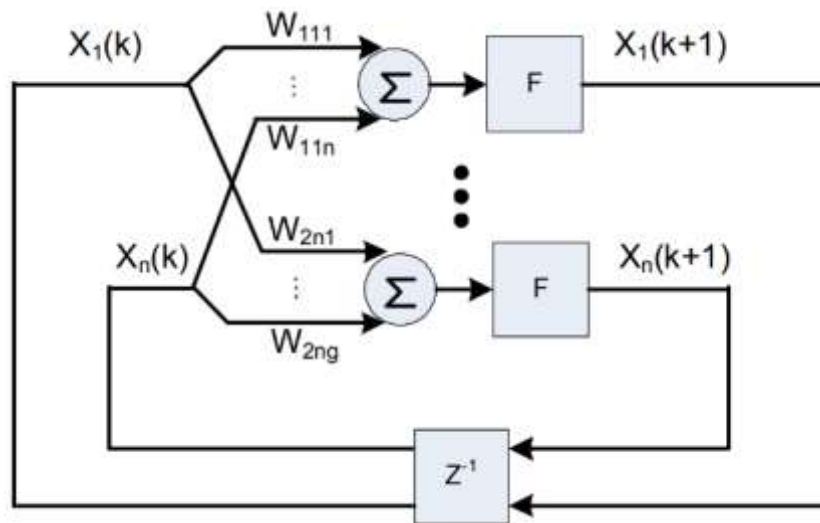


Рисунок 1.18 – Модель нейронної мережі Хопфілда [105]

Ряд робіт показує, що НМХ дають хороші результати в задачах знаходження найкоротшого або оптимального шляху. З іншого боку, основним недоліком мережі даного виду є її можлива нестабільність і той факт, що НМХ не завжди дає оптимальне рішення [29, 74, 156]. Проте, як показав Хопфілд, у випадку, якщо отримане рішення не є оптимальним, його можна буде віднести до категорії рішень, які дуже близькі до оптимальних, тобто, є суб-оптимальними [86].

Використання НМХ для аналізу пересування БПЛА на теперішній час не є класичним застосуванням та деякими авторами визнається як неперспективне. Тому накопичення досліджень у цьому напрямі, а також вдосконалення критеріїв, умов, та методів обробки результатів як моделювання, так і апаратних реалізацій, у подальшому покажуть доцільність або негатив такого підходу.

1.7 Формулювання задач дослідження

Проведений аналіз предметної області дослідження показав, що на сьогоднішній день методи, моделі та комп'ютерні системи, створені для забезпечення функціонування ШГКМ, вимагають розвитку та вдосконалення:

- важливою вимогою до функціонування КФО у складі РММ є чітке визначення часу роботи від автономного джерела напруги (найчастіше –

аккумулятора), після чого КФО повинен бути знятим з маршруту та направленим на підзарядку для попередження втрати такого пристрою;

– для якісного виконання технологічних та моніторингових завдань необхідно підвищувати точність визначення площі покриття території зграєю БПЛА з урахуванням зміни топології такої РММ у часі;

– існуючі рішення в області бездротової передачі інформації не забезпечують у повній мірі гарантовану доставку інформації у разі тимчасової втрати каналу зв'язку;

– в стандартних алгоритмах диспетчеризації завдань між ядрами однокристального обчислювального процесора БПЛА не вирішена задача необхідності розвантаження окремого ядра для керуючих рішень у швидкодинамічних КС, що загрожує їх критичним застосуванням;

– в КС, яка представляє собою зграю БПЛА, моніторингові функції найчастіше дублюються в одній точці різними КФО під час їх руху, що призводить до невиправданих перевитрат обмежених енергетичних ресурсів безпілотних апаратів.

Отже, в роботі за мету визначено підвищення ефективності функціонування та подовження часу життя всіх рухомих об'єктів ШГКМ критичного застосування, якими виступають групи БПЛА з різними конструкціями та схемотехнічними рішеннями. На основі проведеного аналізу сучасного стану та шляхів удосконалення методів створення та функціонування гетерогенних комп'ютерних мереж на основі БПЛА побудовано структурно-логічну схему дисертаційного дослідження, що наведена на рис. 1.19.

Для досягнення поставленої мети визначені до розв'язання такі задачі:

1) провести аналіз сучасного стану та шляхів удосконалення методів створення та функціонування гетерогенних комп'ютерних мереж на основі БПЛА;

2) розробити теоретичні основи опису руху БПЛА з використанням засад броунівського руху з урахуванням дрейфу та розміру БПЛА при їх ройовому використанні;

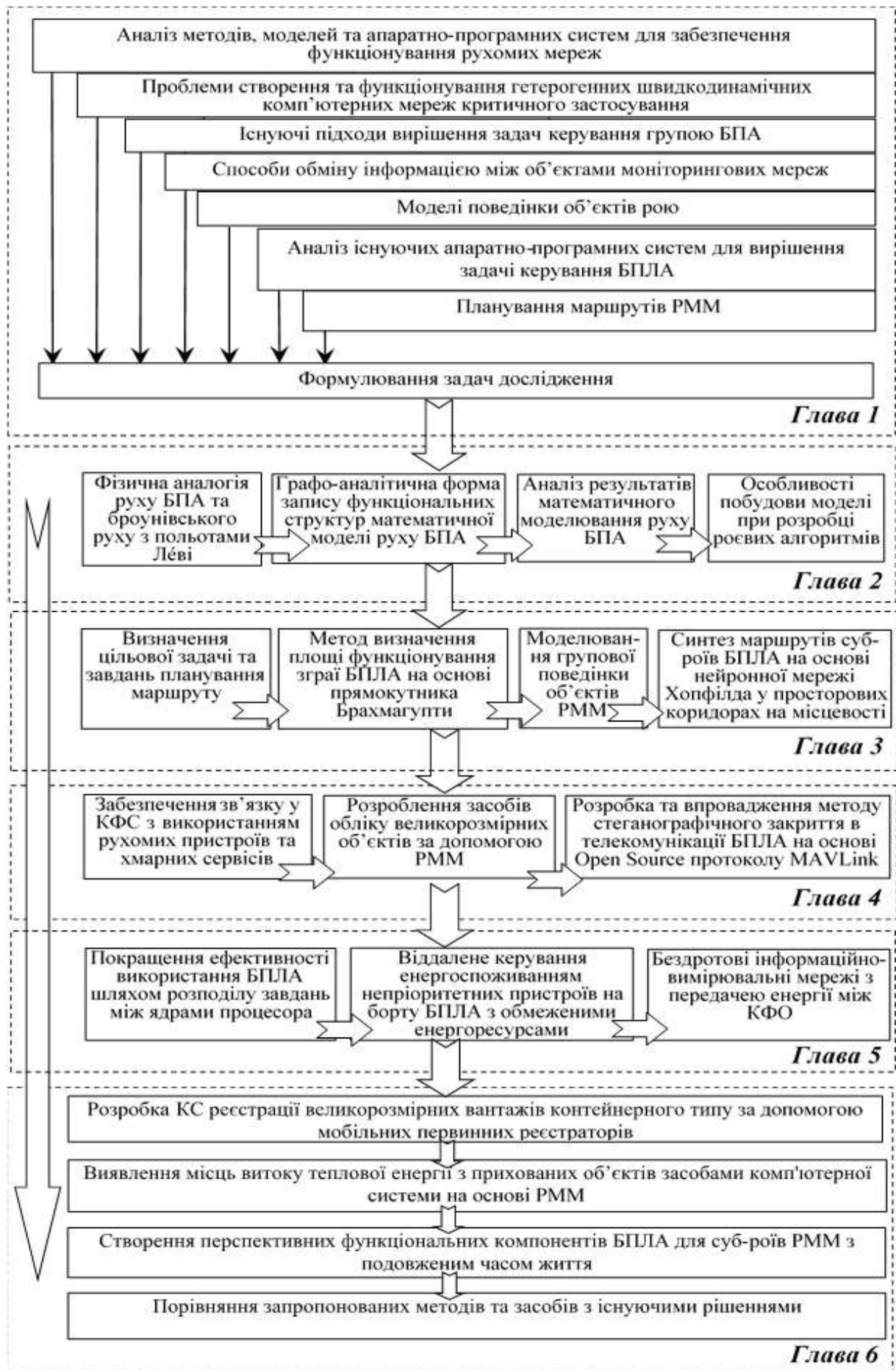


Рисунок 1.19 – Структурно-логічна схема дисертаційного дослідження

3) розробити метод визначення площі функціонування зграї БПЛА з урахуванням зміни топології рухомих моніторингових мереж (РММ) та уточненням необстеженої площі на місцевості в обмежених просторових коридорах з подальшою конкатенацією знайдених рішень та синтезом суб-оптимальних маршрутів;

4) розробити засоби обліку великорозмірних об'єктів за допомогою РММ з гарантованою доставкою інформації та удосконаленням захисту даних щодо місцезнаходження рухомих реєстраторів;

5) розробити теоретичні основи аналізу та інтелектуалізації системи управління навантаженням БПЛА технологічними завданнями з розподілом їх між ядрами однокристального процесора (CPU та/або GPU) БПЛА з вивільненням окремого ядра для задач управління польотом, відключенням неперіоритетних пристроїв та передаванням енергії між КФО за технологією PoWiFi;

6) розробити комп'ютерні системи з використанням ШГКМ для вирішення прикладних завдань, провести експериментальні дослідження їх застосування у різних галузях, розробити конструкції елементів БПЛА, здатні подовжити час життя ШГКМ та захист даних на БПЛА.

7) впровадити результати досліджень.

Висновки до Розділу 1

1. На основі проведеного аналізу структур мережевої взаємодії об'єктів гетерогенних мереж розкрито переваги використання централізованого управління всією групою пристроїв при невеликій кількості БПЛА. При збільшенні кількості БПЛА у групі зростає навантаження на канал зв'язку між КЦ (оператором) та кожним БПА, а також безпосередньо на КЦ, – тому подальшим розвитком є побудування гетерогенних структур комп'ютерних мереж з розробленням методів ройового управління зграєю БПЛА, розбитою на суб-рої. Обґрунтовано, що найбільш перспективним є розроблення методів та алгоритмів перевизначення задач та планування маршрутів БПЛА з урахуванням

швидкодинамічних властивостей РММ та досягненням самозагоєння мережевої структури суб-рою.

2. Сформульовані вимоги до наявності електронних компонентів та програмних функцій, які мають бути реалізовані у польотному контролері на борту БПЛА.

3. Обґрунтовано доцільність використання нейронної мережі Хопфілда (НМХ) для формування маршрутів пересування БПЛА в обмежених просторових коридорах.

4. Більшість рішень для БПЛА є працездатними та ефективними для інших типів БПА, що пересуваються в іншому, не тільки повітряному, середовищі.

5. На основі проведеного багатофакторного аналізу РММ побудовано структурно-логічну схему дисертаційної роботи, обґрунтовані задачі дослідження.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ БЕЗПЛОТНИХ АПАРАТІВ

2.1 Фізична аналогія руху БПЛА та броунівського руху з польотами Ліві

2.1.1 Теоретичні основи опису траєкторії руху БПЛА з використанням засад броунівського руху, описаного рівнянням Ланжевена

Броунівський рух описує хаотичний рух частинок, які на порядок більші ніж розміри молекул рідини, в якій вони знаходяться, та для яких. Математично броунівський рух був описаний Ейнштейном у 1905 р. Ланжевен застосував інший підхід до мікроскопічного опису броунівського руху, використавши другий закон Ньютона до окремої броунівської частинки, що використано сучасними дослідниками для опису руху робототехнічних об'єктів, для яких довжина траєкторії без зіткнень також повинна набагато перевищувати розмір самих об'єктів [128, 173].

На відміну від мікроскопічного опису броунівського руху, рівняння Ланжевена є абстрактними. В ньому описана траєкторія лише однієї броунівської частинки. Частинки рідини, в якій рухається ця броунівська частинка, не моделюються явним чином, але їх зіткнення враховуються в шумовому члені рівняння Ланжевена. Рівняння Ланжевена – стохастичне диференціальне рівняння (СДР, англ. SDE), що використовується в статистичній фізиці для опису процесів із випадковими силами («шумами»), зумовленими макроскопічним середовищем. Рівняння Ланжевена з джерелом шуму успішно описує стандартний броунівський рух по Ейнштейну (у фізиці) або «вінерівський процес» з неперервним часом (в математиці). Але саме рівняння не враховує мікроскопічну структуру об'єкта (в нашому випадку – комп'ютерні та механічні компоненти БПЛА, які визначають його поведінку у просторі).

Рівняння Ланжевена описує траєкторію руху частинки у двовимірному просторі за допомогою параметрів швидкість $\vec{v} = (v_1, v_2)^T$ та положення $\vec{R} = (R_1, R_2)^T$ системою СДР 1-го порядку [173].

$$\begin{cases} \vec{v} = \frac{d\vec{R}}{dt}, \\ m \frac{d\vec{v}}{dt} = -\gamma \vec{v} + \vec{\Psi}(t), \end{cases} \quad (2.1)$$

де m – маса частинки (подібна масі БПЛА);

γ – постійна в'язкого тертя (також називається коефіцієнтом опору), яка визначається додатковими впливами на рух дрона у середовищі, зумовленими природними силами або метеоумовами – швидкістю вітру, вологістю, температурою, тиском тощо, – які при швидкодинамічних процесах можна вважати квазіпостійними протягом певного проміжку часу, що дорівнює часу витрати заряду акумулятора БПЛА;

$\vec{\Psi} = (\Psi_1, \Psi_2)^T$ – шумовий член, який описує випадкові сили, що діють на частинку і представляють собою стохастичний процес (аналогічний впливу дії засобів РЕБ, керуючих сигналів від інших членів зграї, зіткнення з іншими БПЛА тощо).

Таким чином, рівняння Ланжевена описує стохастичний процес. Системи СДР дозволяють описувати поведінку динамічних систем з урахуванням впливу випадкових факторів.

Дослідження останніх років переконливо показали [252, 396], що в нелінійних системах вплив шуму може описувати більш впорядковані режими, призводити до утворення більш регулярних структур, збільшувати ступінь когерентності, викликати збільшення відношення сигнал/шум і т. п. Іншими словами, шум у нелінійних системах, далеких від рівноваги, може відігравати конструктивну роль, викликаючи зростання ступеня порядку в системі. У цих ситуаціях енергія шуму може застосовуватися для конструктивних цілей на противагу звичайній ролі шуму як завади та наближує результати моделювання до реальної поведінки динамічних систем [78, 128, 173].

Для випадку броунівського руху Ланжевен визначає, що оскільки $\vec{\Psi}$ описує додаткову силу, яка тримає частинку в русі, незважаючи на тертя, то сила $\vec{\Psi}$ може

бути визначена. Крім того, через нерегулярність цієї сили вбачається, що середнє значення додаткової сили $\langle \vec{\Psi} \rangle = 0$.

Тоді в математичній моделі кожна така траєкторія буде представлена множиною відрізків різної довжини (рис. 2.1). Якщо фіксувати через рівні інтервали часу Δt положення броунівської частинки з радіусом α відносно точки «0», вибраної за початок відліку, то, хоча частка рухається по складній ламаній траєкторії, декілька разів змінюючи напрямок швидкості, її зміщення з точки «0» за час Δt описується радіус-вектором \vec{R} (рис. 2.1).

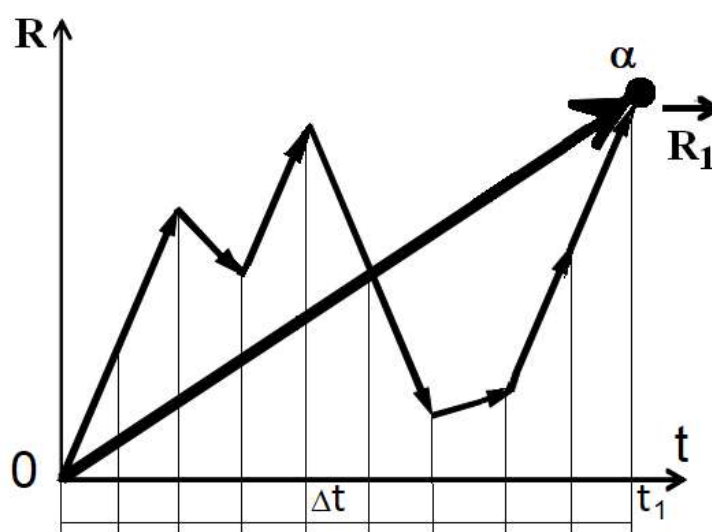


Рисунок 2.1 – Зміщення частинки розміром α від точки старту «0» та реальна траєкторія броунівського руху

За такими умовами модель на основі рівняння Ланжевена для броунівського руху з дрейфом виглядатиме [78]:

$$d\vec{R}_t = \vec{A}(\vec{R}_t, t)dt + \vec{F}(t), \quad (2.2)$$

де $\vec{A}(\vec{R}_t, t)$ вказує напрямок і описує детермінований рух на основі інформації, отриманої від оточення. В описі руху БПЛА є коефіцієнтом так званого «дрейфу», який описує рух з постійною швидкістю, оскільки він є результатом постійної сили, що діє на об'єкт руху;

$\vec{F}(t)$ – шум як послідовність некорельованих імпульсів сили; тобто, на компонент вектора сили, викликаного зіткненням, не впливають інші компоненти.

Це рівняння чисельно моделюється стохастичним процесом за допомогою вінерівського процесу W_t .

$$d\vec{R}_t = \vec{A}(\vec{R}_t, t)dt + \vec{B}(\vec{R}_t, t)dW_t, \quad (2.3)$$

де $\vec{B}(\vec{R}_t, t)$ – коефіцієнт, що визначає інтенсивність стохастичного руху;

W_t – стандартний броунівський рух або стандартний вінерівський процес, тобто стохастичний процес, неперервний на інтервалі $t \in [0, T]$, що математично виражає випадкові блукання та відповідає трьом умовам:

1) $W_0 = 0$ (з ймовірністю «1»);

2) W_t майже напевно безперервний для $0 \leq s < t \leq T$, є нормально розподіленою випадковою величиною, яка задана приростом $(W_t - W_s)$ з середнім значенням, рівним «0» та дисперсією $(t - s)$; тобто процес з незалежними приростами з нормальним розподілом

$$W_t - W_s \sim \sqrt{t - s} \cdot \mathcal{N}(0,1), \quad (2.4)$$

де $\mathcal{N}(0,1)$ позначає нормально розподілену випадкову величину з нульовим середнім і дисперсією, що дорівнює «1»;

3) для $0 \leq s < t < u < v \leq T$ прирости $W_t - W_s$ та $W_v - W_u$ є незалежними.

З рівняння (2.3) неважко бачити, що відмінність від звичайного диференціального рівняння полягає в наявності в правій частині додаткової складової $\vec{B}(\vec{R}_t, t)dW_t$, що містить множник dW_t (диференціал від вінерівського випадкового процесу), який описує вплив випадкових факторів на динаміку \vec{R}_t , тоді як перший доданок в основному описує вплив детермінованих факторів.

Для обчислювальних цілей корисно розглянути дискретизований броунівський рух, де W_t задана на дискретних значеннях t . Тоді умови 2 та 3 для вінерівського процесу виглядатимуть:

$$W_i = W_{i-1} + dW_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2.5)$$

де i – номер компоненту вектора;

N – натуральне ціле число.

Кожен приріст dW_i є незалежною випадковою величиною виду

$$dW_i = \sqrt{\Delta t} \cdot \mathcal{N}(0,1). \quad (2.6)$$

Таким чином, в обраній для подальшого розвитку моделі руху інтелектуальних роботизованих систем, заснованої на теорії броунівського руху та найбільш розвиненої в роботах сучасних вчених, враховані дрейф \vec{A} та дифузія \vec{B} для вектора координат \vec{R} стохастичного диференціального рівняння Ланжевена.

Продовжуючи розвиток обраної у якості базової математичної моделі, наведеної у вигляді рівнянь (2.3) – (2.6), можна зазначити, що функції \vec{A} та \vec{B} характеризуються базовим алгоритмом управління. Функція \vec{A} вказує напрямок і описує детермінований рух на основі інформації, отриманої від оточення. Для БПЛА може включати в себе позитивний вплив інших БПЛА, наприклад тих, що передають інформацію про напрямок руху. Функція \vec{B} описує випадкову складову руху, включає в себе впливи інших БПЛА, які заважають дрону рухатись, наприклад, через необхідність запобігання зіткненням.

Таким чином, можна дістати уяву щодо поведінки зграї БПЛА без моделювання усієї сукупності КФО, враховуючи їх взаємодію шляхом введення у рівняння, що описує рух одного БПЛА, стохастичного компонента. Тоді рівність (2.3) може описувати рух одного БПЛА, для якого взаємодія з іншими

БПЛА завдяки функціям \vec{A} та \vec{B} може бути оцінена без моделювання руху інших БПЛА.

Відзначимо, що стохастичне рівняння (2.3) задане в диференціальній формі, на відміну від звичайних диференціальних рівнянь, що задаються у формі з похідною. Це відбувається тому, що багато стохастичних процесів (таких, як броунівський рух) є неперервними, але не мають похідних, тому СДР (2.3) за визначенням є інтегральним рівнянням і має бути переписаним в інтегральній формі наступним чином:

$$\vec{R}(t) = \vec{R}_0 + \int_0^t \vec{A}(\vec{R}(s)) ds + \int_0^t \vec{B}(\vec{R}(s)) dW(s), 0 \leq t \leq T. \quad (2.7)$$

Функції \vec{A} та \vec{B} є функціями часу, початкова умова \vec{R}_0 – випадкова величина. Фактично у формулі (2.7) надана сума звичайного інтеграла та спеціального стохастичного інтеграла, що враховує броунівський рух. Рішення $\vec{R}(t)$ є випадковою змінною для кожного t .

Для одновимірного простору (без врахування швидкості БПЛА, яка вважається за константу та встановлюється при виборі режиму функціонування – Waypoints, Draw, Sport або ін. [306]) в диференціальній формі рівняння Ланжевена можна записати, як

$$\begin{aligned} d\vec{R}_t &= \lambda \vec{R}(t) dt + \mu \vec{R}(t) dW(t), \\ \vec{R}(0) &= \vec{R}_0, \quad 0 \leq t \leq T, \end{aligned} \quad (2.8)$$

де λ і μ – реальні константи, такі, що $\lambda \vec{R} = \vec{A}(\vec{R})$ та $\mu \vec{R} = \vec{B}(\vec{R})$ в (2.3).

Щоб знайти точне аналітичне рішення (2.8) для визначення траєкторії БПЛА доцільно застосувати модель Блека-Шоулза, розроблену та діючу на фінансовому ринку для ціноутворення на опціони [27]. Як і зміна просторових координат БПЛА, зміна ціни має безперервний характер і описується за допомогою простого вінерівського процесу. Проведемо аналогії між

обмеженнями зазначеної моделі на фінансовому ринку та при моделюванні руху БПЛА:

1) постійна волатильність на весь час життя опціону відповідає інтенсивності стохастичного руху БПЛА;

2) ціна базового активу при розгляді траєкторії БПЛА є аналогом координати у просторі та відображається випадковою величиною з логарифмічно нормальним розподілом.

Правомірність проведених аналогій має бути підтверджена або спростована оцінкою якості моделі та експериментальним шляхом.

З урахуванням проведених аналогій між фінансовою моделлю та моделлю визначення траєкторії одного БПЛА з урахуванням впливу на його рух інших членів зграї, точне рішення рівняння Ланжевена можна представити у вигляді рівняння Блека-Шоулза (БШ):

$$\vec{R}_t = \vec{R}_0 \cdot \exp \left(\left(\lambda - \frac{1}{2} \mu^2 \right) t + \mu \cdot W(t) \right), \quad (2.9)$$

де λ – коефіцієнт дрейфу БПА;

μ – коефіцієнт, що визначає стохастичну складову у русі БПЛА (аналогічний дифузії броунівського руху);

$W(t)$ – вінерівський процес.

Далі необхідно визначити чисельний метод для розв'язання (2.8), і тоді можна розглядати рішення $\vec{R}(t)$ як випадкову величину.

Одним з найбільш економним з точки зору витрачання обчислювальних ресурсів для дискретизації рівняння (2.8) можна вважати чисельний метод Ейлера-Маруяма (ЕМ), який є аналогом метода Ейлера для звичайного диференціального рівняння.

Щоб застосувати зазначений чисельний метод до (2.8) на інтервалі $[0, T]$ – часу життя БПЛА до наступної перезарядки акумулятора, – спочатку будемо дискретизувати цей інтервал.

Нехай $\Delta t = T/L$ для деякого натурального цілого числа L , $t_j = j \cdot \Delta t$. Числове наближення до $R(t_j)$ будемо позначати \vec{R} . Тоді метод ЕМ для чисельного рішення рівняння Ланжевена (2.8) приймає вигляд

$$\begin{cases} R_j = R_{j-1} + \lambda R_{j-1} \Delta t + \mu R_{j-1} (W_{t_j} - W_{t_{j-1}}), j = 1, 2, \dots, L, \\ W_{t_j} - W_{t_{j-1}} = W(jP\Delta t) - W((j-1)P\Delta t) = \sum_{k=jP-P+1}^{jP} dW_k, \\ dW_k = \Delta t^{\frac{1}{2}} \cdot \mathcal{N}(0,1), \end{cases} \quad (2.10)$$

де j – індекс, що позначає номер ітерації обчислювального вектора;

P – коефіцієнт кількості ітерацій. У результаті числових експериментів прийнято, що $P = 4$. При менших значеннях P точність ЕМ буде підвищуватись, але й обчислювальні витрати теж зростатиме, час розрахунків суттєво збільшується.

Використання комп'ютера та генератора випадкових чисел дозволяє моделювати рух такого БПЛА. Результатом є одна траєкторія з нескінченної множини всіх можливих траєкторій. Однак, щоб вивести продуктивність алгоритму управління, треба змоделювати поведінку рою в середньому. Ця поведінка може бути ідентифікована шляхом аналізу багатьох траєкторій, наприклад, шляхом моделювання рівняння Ланжевена методом Монте-Карло, або ін. для необхідної кількості співіснуючих БПЛА [78, 176]. Однак, цей підхід до моделювання має бути оціненим за обчислювальними витратами.

Для створення та функціонування мереж БПЛА та інших мультиробототехнічних систем часто буває важливим отримати або спрогнозувати у режимі реального часу інформацію про стан та місцезнаходження такої системи у визначений момент часу. Це може бути необхідним, наприклад, планування обсягу технологічних дій БПЛА, для організації пунктів поточного технічного обслуговування БПЛА – дозарядки батарей, дозаправки технологічним вантажем тощо.

2.1.2 Імплементация теорії «прогулянок Лєві» для опису непередбачуваних перешкод на траєкторії руху БПЛА

Слід зауважити, що в розглянутій моделі точного та чисельного визначення траєкторії руху БПЛА (2.7) – (2.10) враховані лише поняття «дрейфу» та «дифузії», спільні з теоретичними засадами броунівського руху. На відміну від загальних понять, БПЛА під час руху можуть стикатись з непередбачуваними механічними перешкодами або електромагнітними завадами, які порушують траєкторію, описану моделлю (2.7) – (2.10). Траєкторія руху при цьому сильно відхиляється від алгоритмізованої, але після обминання перешкоди кожен БПЛА повинен повернутись до власної, запланованої траєкторії. В задачі моделі входить прогноз подовження запланованої траєкторії в такому разі, та відповідно витрачений при цьому заряд акумулятора.

Такі аномальні випадкові процеси і відповідні аномальні дифузійні явища, що демонструють явну відмінність від звичайного броунівського руху, останнім часом спостережувані та інтенсивно вивчаються для опису стохастичних процесів як фізичної, так і нефізичної природи, тобто у технічних динамічних системах [80]. Так, наприклад, середній квадрат відхилення частинки від початкового положення не змінюється більш у часі за лінійним законом, а замість цього зростає або повільніше («субдифузія»), або більш швидко («супердифузія»), або зовсім необмежено. Виникнення аномальної дифузії пояснюється відхиленням реальної статистики флуктуацій від гаусова закону.

Необхідна для опису таких процесів макроскопічна модель руху може бути побудованою на основі рівняння Фоккера-Планка, приклади виведення якого та зв'язок з базовим рівнянням Ланжевена досить детально розглянуті в наукових джерелах [78, 173]. Але узагальнення зазначеного рівняння до двовимірного випадку є досить громіздким та складним, тому знову ж таки вимагатиме значних обчислювальних ресурсів, що неприйнятно для швидкодинамічних задач.

Деякі дослідники вважають, що рух групи БПЛА з достатнім ступенем точності описується математичною схемою руху, так званою «прогулянкою Лєві» або «польотом Лєві» [185]. Якщо при гаусовому (нормальному) розподілу

«хвіст» розподілу швидко спадає по експоненті, то зазначений розподіл Ліві характеризується на «хвостах» степеневими законами, в яких розподіл ймовірності має функцію щільності ймовірності, яка спадає на нескінченності степеневим чином («важкі хвости»).

«Прогулянки Ліві» характеризуються нескінченною дисперсією, а їх природи розподілені по σ -стійким законам з індексом стійкості $0 < \sigma < 2$ (розподіл Ліві). Такі стохастичні процеси мають ряд особливих властивостей. Моменти їх приростів кінцеві, але самі процеси є негаусовими (рис. 2.2). Параметр σ визначає форму розподілу таким чином, що можна отримати різні форми розподілу ймовірностей в хвостовій області. Чим більше параметр σ , тим коротше область хвоста (рис. 2.2, б).

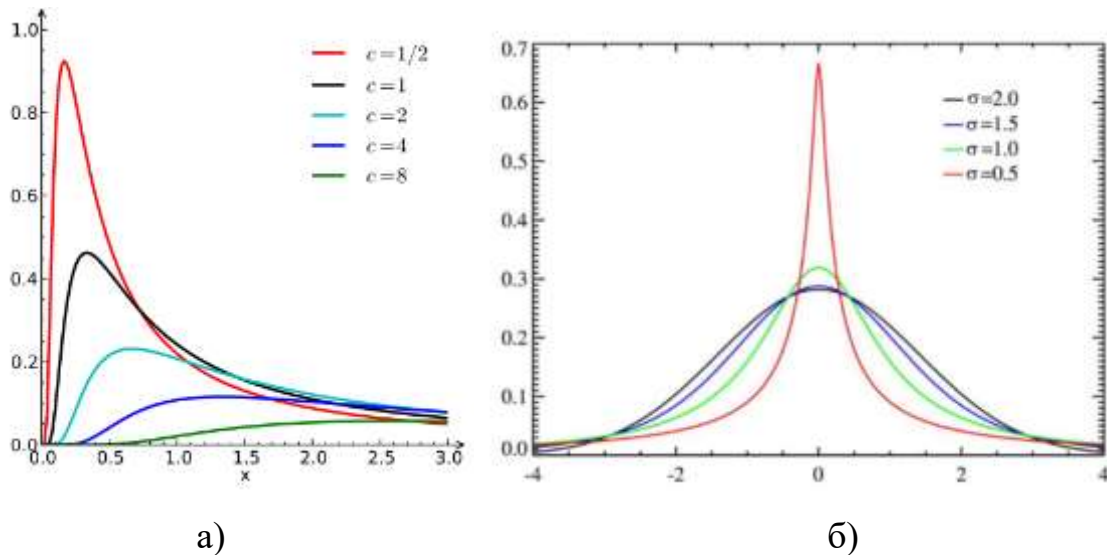


Рисунок 2.2 – «Товсті хвости» в розподілі Ліві з ненульовим середнім (а) та з математичним сподіванням, що дорівнює нулю (б): по осі абсцис – дисперсія, по осі ординат – логарифмічний масштаб [185]

Товстий кінець або «хвіст» (англ. «fat-tailed distribution») на кінці функції щільності розподілу Ліві вказує на аномально високу ймовірність катастрофічних подій (критичних ситуацій). Це означає ризик виникнення такої події, яке відбудеться з низькою ймовірністю, і яке важко спрогнозувати, але їм не можна нехтувати, оскільки перешкоди все ж можуть з'явитись. Слід зауважити, що на відміну від рис. 2.2, б в технічних динамічних системах функція розподілу Ліві може бути сильно асиметричною (рис. 2.2, а).

Окрім відхилень від траєкторії через механічні перешкоди з поверненням на маршрут з дотриманням неперервності траєкторії, мають місце розриви траєкторії, обумовлені необхідністю дозарядки батарей на базі. Такий тип траєкторії руху БПЛА може бути описаним як «політ Лєві» та має властивості «супердифузії Лєві».

Терміни «політ Лєві» (англ. Lévy flight) та «прогулянка Лєві» (англ. «Lévy walk»), введені Бенуатом Мандельбротом у 1977 р. [328], пізніше були розширені дослідниками для включення випадків, коли випадковий шлях відбувається на дискретній сітці, а не на безперервному просторі, та характеризується багатьма невеликими рухами в поєднанні з декількома довшими траєкторіями (рис. 2.3).

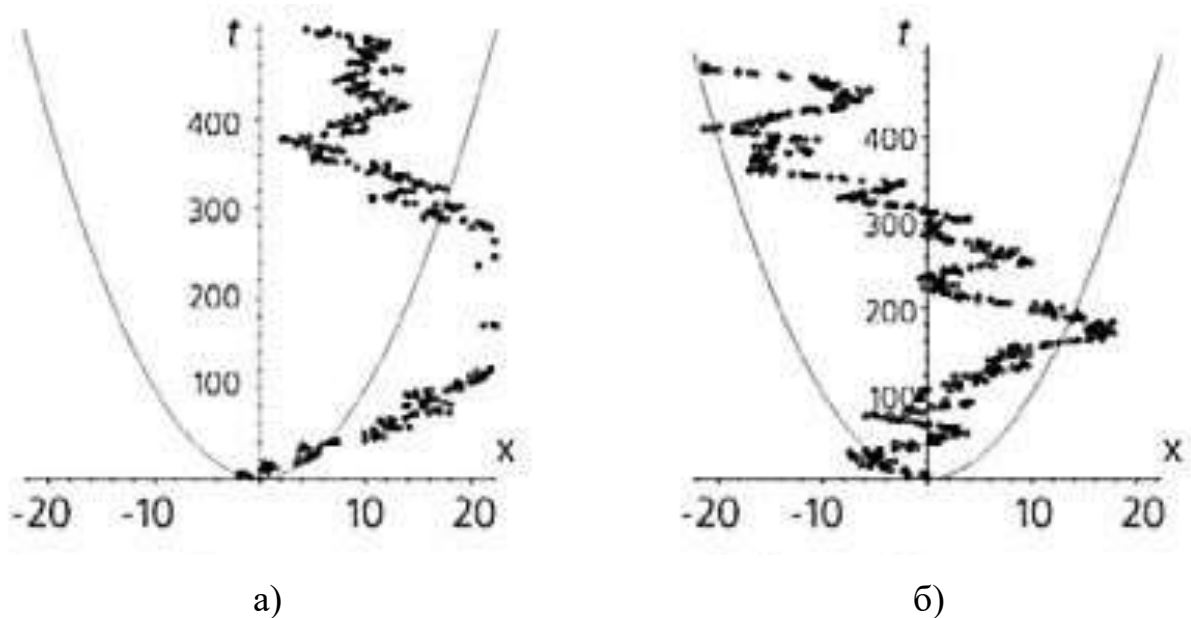


Рисунок 2.3 – «Польоти Лєві» з розривами у траєкторії (а) та неперервна траєкторія «прогулянок Лєві» (б) [389]

«Прогулянка Лєві» є одним з видів випадкового блукання, в якому кожний наступний хід вибирається випадковим чином і без впливу будь-якого попереднього ходу. У «прогулянці Лєві» більшість кроків знаходяться в невеликій області, але іноді проводяться довші маршрути.

З точки зору застосування теоретичних положень Лєві до опису траєкторії руху БПЛА «польоти Лєві» та «прогулянки Лєві» є двома парадигмами

стохастичної складової руху БПЛА, що мають як спільні риси, так і принципові відмінності. Однією з основних відмінностей є розрив у порівнянні з безперервністю їх траєкторій. Як наслідок, добре розвинена теорія «польотів Лєві» пов'язана з їхніми протиприродними фізичними властивостями, які в свою чергу наближаються та вирішуються концепцією «прогулянок Лєві».

Так, наприклад, «прогулянкою Лєві» можна вважати неперервну траєкторію БПЛА при зустрічі на шляху механічної перешкоди (будівлі, інших інженерних споруд, іншої зграї, тощо), а до «польоту Лєві» з розривом траєкторії слід віднести ситуацію, коли БПЛА залишає маршрут для дозарядки акумуляторі на спеціальній базі, але потім повертається у просторову точку, де траєкторія була перервана.

Для досягнення швидкого математичного результату змінимо чисельне рішення рівняння Ланжевена за методом ЕМ з імплементацією в його механізм «польоту Лєві» для опису відхилень від маршруту, обумовлених перешкодами на шляху БПЛА.

Тоді модель траєкторії руху БПЛА на основі рівняння Ланжевена (2.8), її точне рішення (2.9) за БШ та чисельна апроксимація (2.10) за ЕМ для процесу супердифузії (з врахуванням «прогулянок Лєві») зміниться через зміну приросту незалежної випадкової величини вінерівського процесу у стохастичному члені початкового рівняння з заміною нормального розподілу (2.6) на розподіл Лєві з індексом стійкості $0 < \sigma < 2$:

$$dW_k = \left(1 - \Delta t^{\frac{1}{\sigma}} \cdot \mathcal{N}(0,1) \right)^{-\frac{1}{\sigma}}, \quad 0 < \frac{1}{\sigma} < \frac{1}{2}. \quad (2.11)$$

«Лєвіподібний» або «броуноподібний» зразок маршруту дозволяє спрогнозувати зменшення активного часу використання батареї через зовнішні впливи та визначити довжину реальної траєкторії S_T , пройденої БПЛА за час до необхідної дозарядки акумуляторів. Підсумовуючи вищенаведене, результуюча робоча модель розрахунку траєкторії (просторового находження та сумарної

довжини) БПЛА на основі рівнянь Ланжевена з урахуванням «прогулянок Лєві» може бути записана у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_j = \vec{R}_{j-1} + \lambda \vec{R}_{j-1} \Delta t + \mu \vec{R}_{j-1} (W_{t_j} - W_{t_{j-1}}), j = 1, 2, \dots, L, \\ W_{t_j} - W_{t_{j-1}} = W(jP\Delta t) - W((j-1)P\Delta t) = \sum_{k=jP-P+1}^{jP} dW_k \\ dW_k = \left(1 - \Delta t^{\frac{1}{2}} \cdot \mathcal{N}(0,1) \right)^{-\frac{1}{\sigma}}, 0 < \frac{1}{\sigma} < \frac{1}{2}, \\ S_T = \sum_{j=1}^L |R_j|, |R_T| \neq |R_0| + S_T, T = L \cdot \Delta t. \end{array} \right. \quad (2.12)$$

Така модель (2.12), заснована одночасно на теоретичних засадах, сформульованих Ланжевенем та Лєві, враховує повернення БПЛА враховує повернення БПЛА на маршрут слідування з утворенням між сусідніми «короткими» точками маршруту довгих траєкторій, які можна віднести до «прогулянок Лєві». Зміна приростів dW_k за (2.11) з урахуванням «прогулянок Лєві» також має бути врахована при знаходженні точного рішення рівняння Блека-Шоулза з використанням розподілу Лєві (БШЛ). Різниця у результатах моделювання між точним рішенням за рівнянням БШЛ та чисельним за ЕМ з урахуванням «прогулянок Лєві» (ЕМЛ) будуть проаналізовані у подальшому.


Таким чином, коли в достатку прикладів масовості/ тривалості критичної ситуації (вплив РЕБ, зіткнення членів зграї тощо), броунівський підхід є правильним вибором, тому що відображає мікропереміщення БПЛА з поверненням на маршрут в результаті роботи системи управління, – тобто, БПЛА рухаються по траєкторії, близькій до розрахункової.

Однак, коли критична ситуація поодинокі (несподівана перешкода на маршруті – будівля, опора лінії електропередачі, зграя птахів на шляху й т. п. – або заряд батареї становиться менш за критичний та необхідна підзарядка), в русі БПЛА з'являються зразки довгих траєкторій «прогулянок Лєві» або «польотів Лєві», що створюють розриви в траєкторії БПЛА за аналогією з рухом частинок.

2.2 Графо-аналітична форма запису функціональних структур математичної моделі руху БПЛА

При виведенні розрахункових формул для знаходження конкретних значень в процесах, що аналізуються, доцільно відтворити формування логіко-динамічного процесу такого розрахунку.

Для цього можна застосувати метод аналітичного запису процесу перетворення аргументів, що відповідає схемним структурам, в яких функції зображуються у вигляді логічних елементів, на яких базуються комп'ютерні компоненти. Наприклад, для елемента «ТА» аналітичний запис виглядатиме



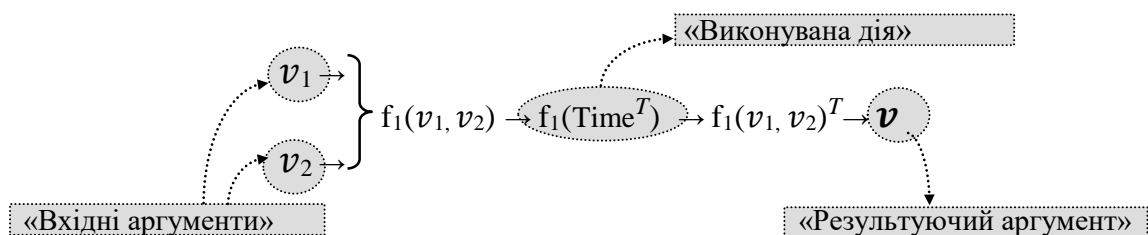
$$(2.13)$$

де « x_1 » і « x_2 » – вхідні аргументи; $f(\&)$ – логічна функція «ТА».

Аналогічний підхід був вперше запропонований для перетворення інформаційних аргументів у функціональних структурах систем управління автономними електро-енергетичними системами [374].

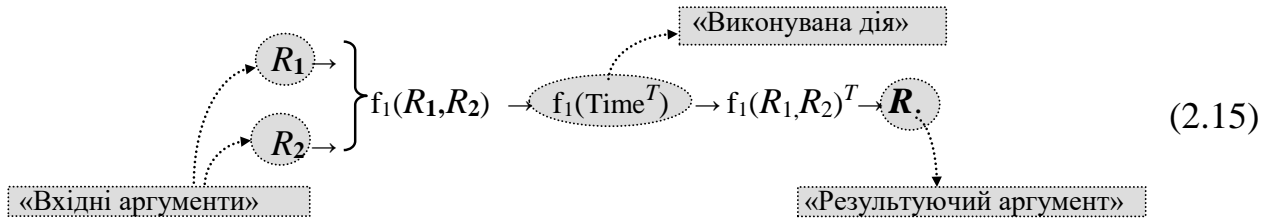
Зважаючи на те, що БПЛА також можливо розглядати як вищенаведену систему, доцільно описати рух БПЛА як подібну сукупність функціональних структур. Для цього наведемо декілька конкретних прикладів.

Для рівняння Ланжевена (2.1) швидкість $\bar{v} = (v_1, v_2)^T$ в аналітичній формі запишемо у вигляді графо-аналітичного виразу:

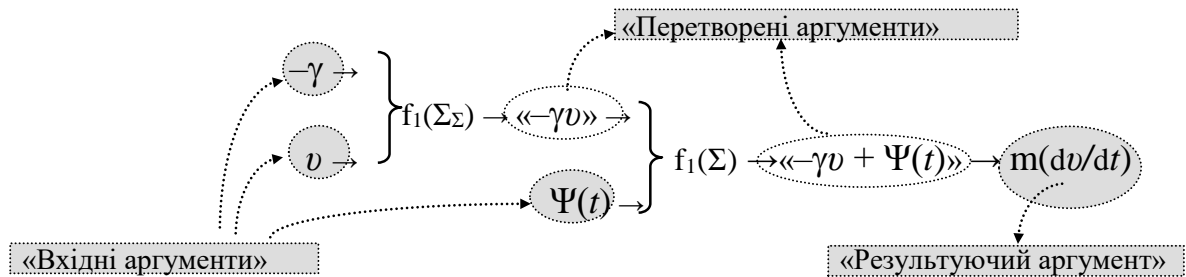
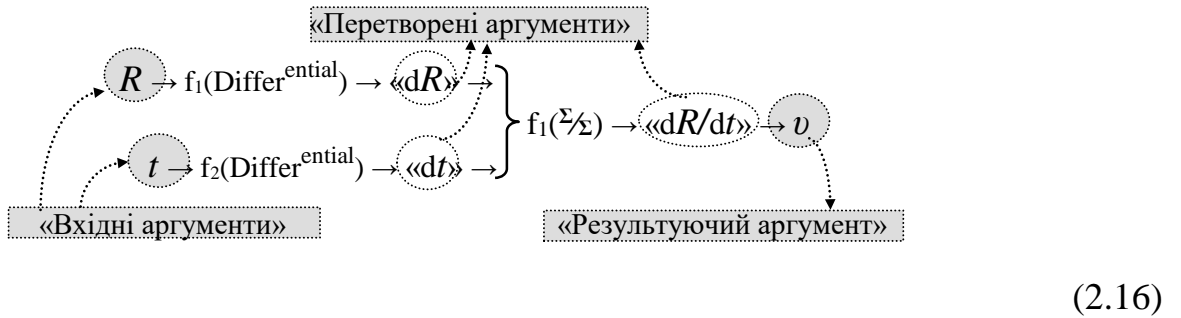


$$(2.14)$$

та положення у просторі $\bar{R} = (R_1, R_2)^T$ в графо-аналітичній формі виглядатиме, як:



Тоді рівняння Ланжевена (2.1) також запишемо у вигляді графо-аналітичного виразу (2.16):

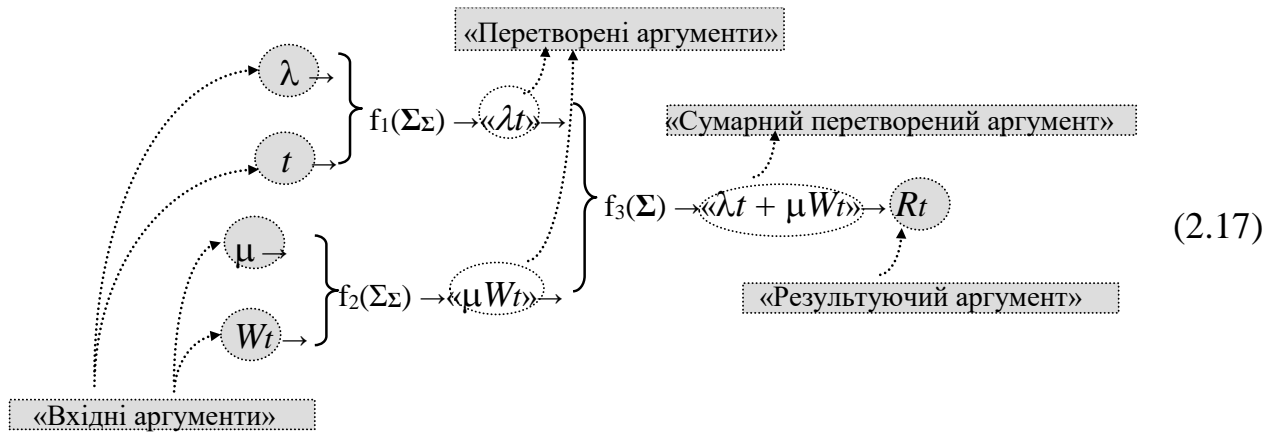


де $f_1(\Sigma)$ – функціональна структура дільника «Перетворених аргументів» $\langle d\bar{R} \rangle$ та $\langle dt \rangle$;

$f_1(\Sigma_\Sigma)$ – функціональна структура помножувача вхідних аргументів – $\langle \gamma \rangle$ та $\langle v \rangle$;

$f_1(\Sigma)$ – функціональна структура суматора вхідного аргументу $\bar{\Psi}(t)$ та перетвореного аргументу $\langle -\gamma v \rangle$.

Розвиваючи запропонований підхід, у графо-аналітичній формі модель (2.8) для броунівського руху з дрейфом в одновимірному просторі виглядатиме, як:

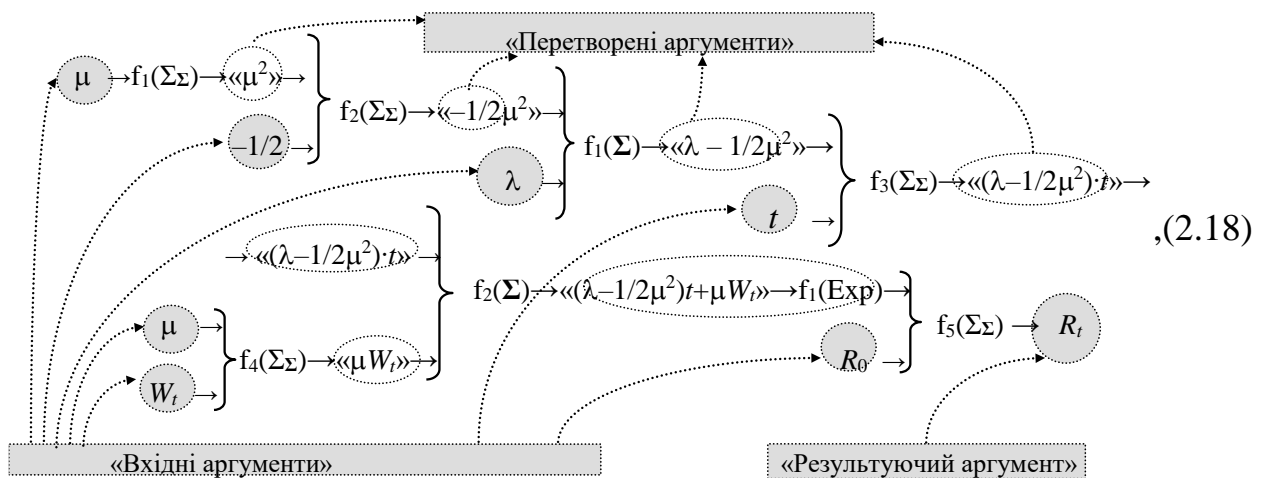


де $f_1(\Sigma_\Sigma)$ – функціональна структура першого помножувача, яка виконує процедуру множення вхідних аргументів λ та t з формуванням «Перетвореного аргументу» $\langle \lambda t \rangle$;

$f_2(\Sigma_\Sigma)$ – функціональна структура другого помножувача, яка виконує процедуру множення вхідних аргументів μ та W_t з формуванням «Перетвореного аргументу» $\langle \mu W_t \rangle$;

$f_3(\Sigma)$ – функціональна структура суматора з вхідними «Перетвореними аргументами» $\langle \lambda t \rangle$ та $\langle \mu W_t \rangle$, яка формує «Сумарний перетворений аргумент» $\langle \lambda t + \mu W_t \rangle$, що відповідає «Результуючому аргументу» $\bar{R}t$.

Тоді для точного рішення рівняння Ланжевена за допомогою рівняння БШ (2.9) графо-аналітична модель виглядатиме, як:



де функціональні структури аналогічні описаним для (2.17).

Графо-аналітичне рівняння (2.18) чисельно моделюється стохастичним процесом, заданим у рівнянні (2.12) за методом Ейлера-Маруяма з урахуванням вінерівського процесу та «прогулянок Ліві».

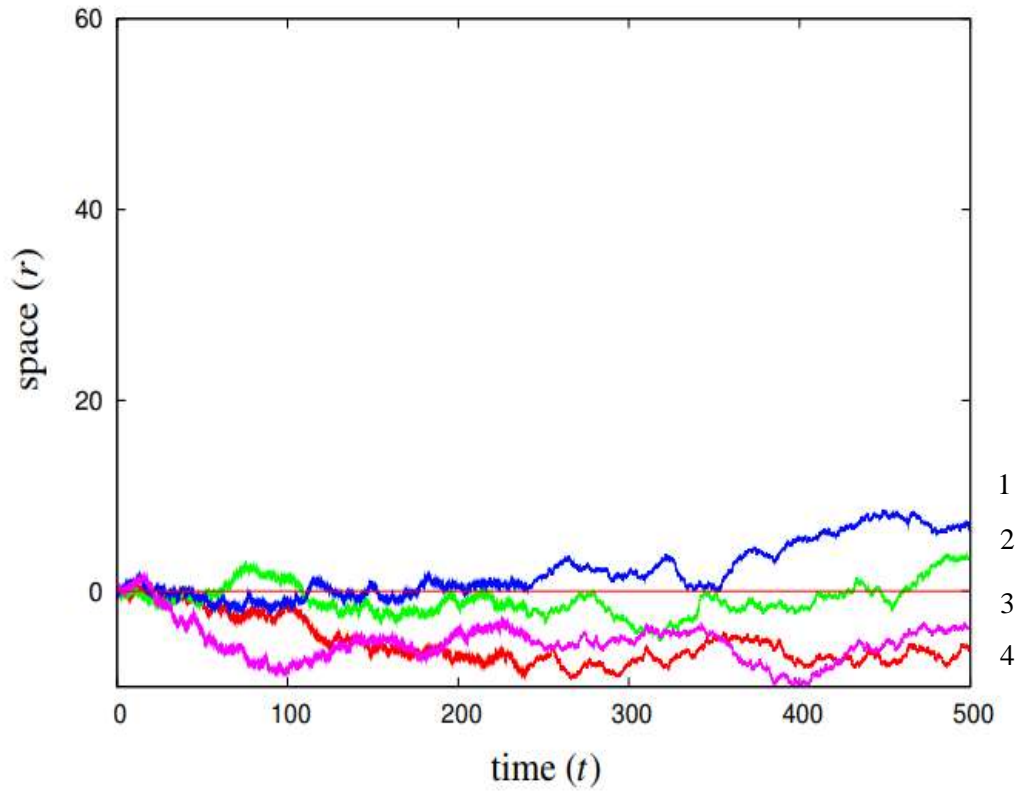
Запропоноване графо-аналітичне представлення моделей траєкторії руху БПЛА дозволяє швидко та безпомилково реалізувати зазначені моделі або у вигляді логічних елементів, на яких базуються комп'ютерні компоненти, або програмним шляхом в інтерактивному середовищі для чисельних розрахунків та візуалізації результатів.

2.3 Аналіз результатів математичного моделювання руху БПЛА

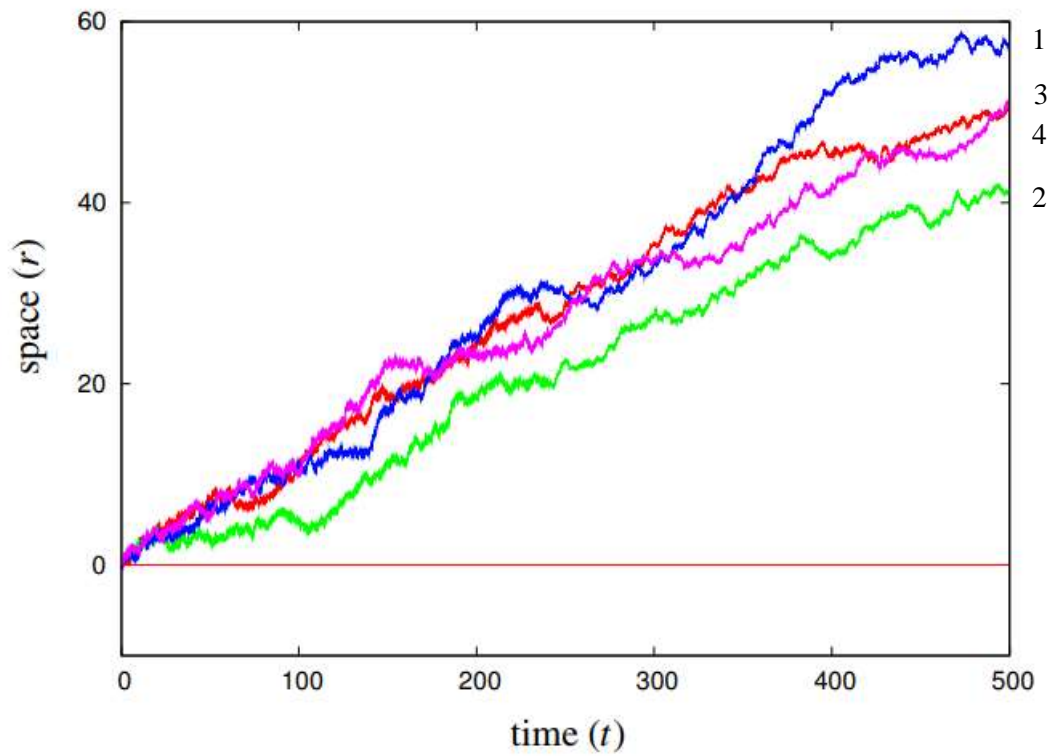
2.3.1 Мікро-моделювання руху БПЛА з урахуванням дрейфу

Згідно з математичною моделлю руху БПА на базі рівняння Ланжевена, розробленою австрійськими вченими у 2010 р. (Hamann H. [78]), яка була прийнята за основу, можливо змоделювати стохастичну поведінку зграї БПЛА без урахування та з урахуванням «дрейфу» (рис. 2.4). Траєкторії, які починаються з $r = 0$, побудовані в одновимірному просторі (швидкість вважається постійною).

З аналізу результатів моделювання випливає, що розрахункова траєкторія руху системи БПЛА (на рис. 2.4 – чотири БПЛА) суттєво подовжується при врахуванні стохастичної поведінки, яку можна описати аналогічно дифузійній складовій броунівського руху $\vec{B}(\vec{R}, t)$. Така модель дозволяє врахувати подовження реальної траєкторії у порівнянні зі зменшеним пройденим шляхом від маси (m)/розміру (α) об'єкта руху (зворотно пропорційна залежність), а також врахувати вплив на БПЛА інших членів групи. Таким чином, на рис. 2.4 зелена лінія (№ 2) відповідає БПЛА з найбільшою масою/розміром, на який найменшим чином впливають стохастичні процеси, та траєкторія руху якого найменш відхиляється від лінійного закону (пряма лінія на рис. 2.4, яка починається з $r = 0$).



а)



б)

Рисунок 2.4 – Одновимірні траєкторії зграї з 4 БПЛА: а – без дрейфу ($A_j = 0$);

б – з урахуванням дрейфу ($A_j = 0,1$) [78]

Також в моделі (2.3) – (2.6) врахований вплив складних метеоумов (переважно сила вітру та напрямок руху БПЛА за напрямом або проти вітру) за допомогою «коефіцієнта дрейфу» $\vec{A}(\vec{R}, t)$.

На відміну від прийнятої за основу, запропонована математична модель ЕМЛ руху БПЛА (2.12) дозволяє обчислити не лише дискретизовані броунівські шляхи, але й врахувати «прогулянки Лєві» при обминанні механічних перешкод та розрахувати довжину реальної траєкторії БПЛА, після проходження якої він повинен повернутись на базу для дозарядки акумуляторів.

Наведені числові експерименти використовують підхід Монте-Карло, тобто випадкові величини моделюються генератором випадкових чисел, і очікувані значення апроксимуються обчисленими середніми значеннями. Слід зазначити, що генератор випадкових чисел у числових експериментах (див. додаток Б.1) генерує послідовність реалізацій випадкової величини за рівномірною функцією розподілу на інтервалі $(0; T)$. Розподіл Лєві відтворюється згідно з (2.11) з урахуванням індексу стійкості $0 < \sigma < 2$.

Моделювання руху БПЛА може бути виконане, наприклад, у середовищі MATLAB від компанії The MathWorks, яке можливо використовувати за ліцензією для університетів Total Academic Headcount або Academic License [117]. MATLAB є дуже зручним середовищем для цього типу процедур, що обумовлено його засобами генерації випадкових чисел і графікою високого рівня. При цьому доцільно використовувати як вбудовані у зазначений пакет прикладні програми для числового аналізу, так і мову програмування, що використовується в даному пакеті. За допомогою MATLAB можуть бути не лише розраховані траєкторії руху БПЛА, а й відтворена візуалізація взаємного переміщення БПЛА суб-рою у 3D-просторі.

Для зазначених потреб у середовищі MATLAB можуть бути використані функції для аналізу даних, зокрема:

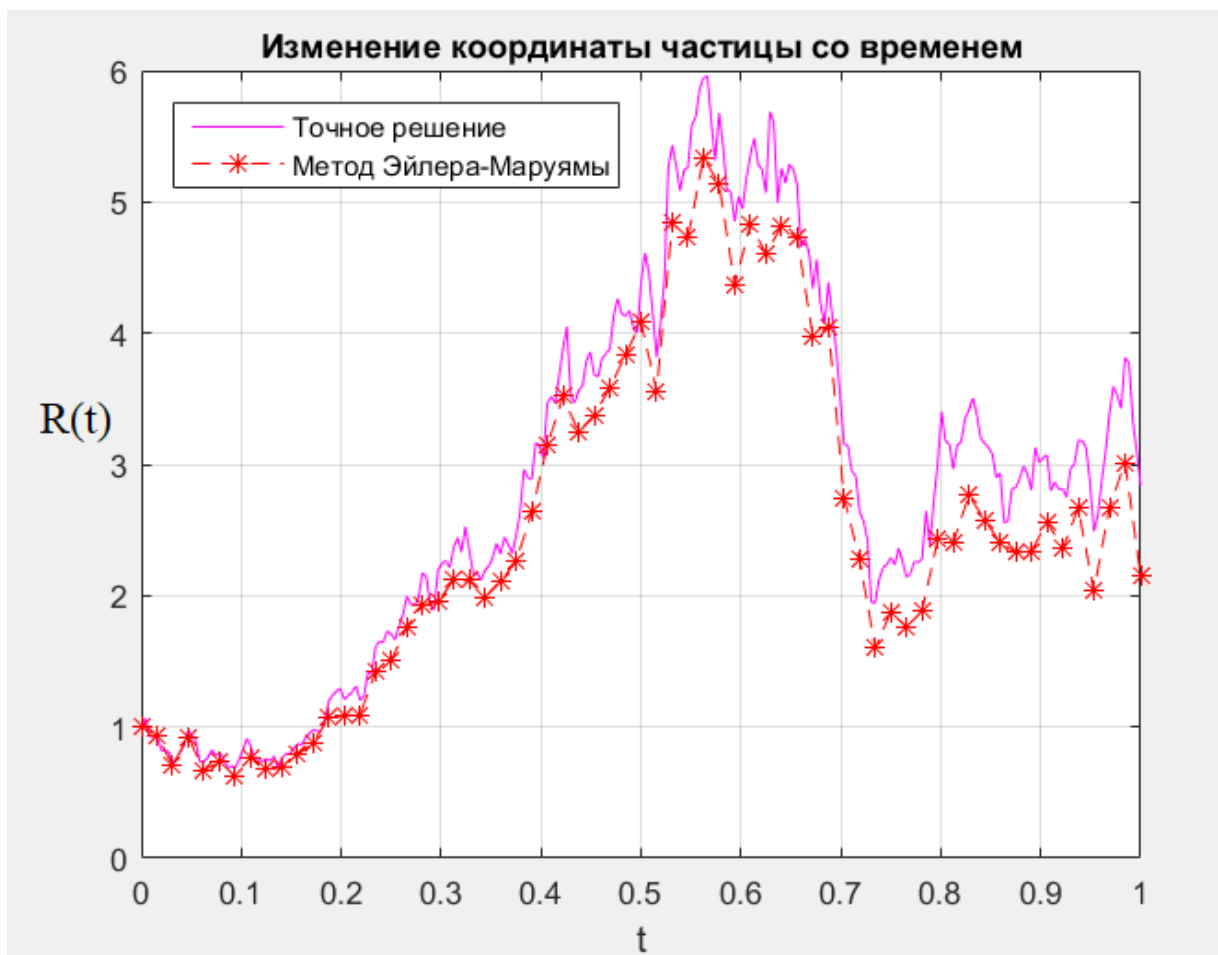
- а) матриці та лінійна алгебра – алгебра матриць, лінійні рівняння, власні значення і вектори, сингулярності, факторизація матриць та інше;
- б) многочлени та інтерполяція – корені многочленів, операції над

многочленами та їх диференціювання, інтерполяція та екстраполяція кривих;

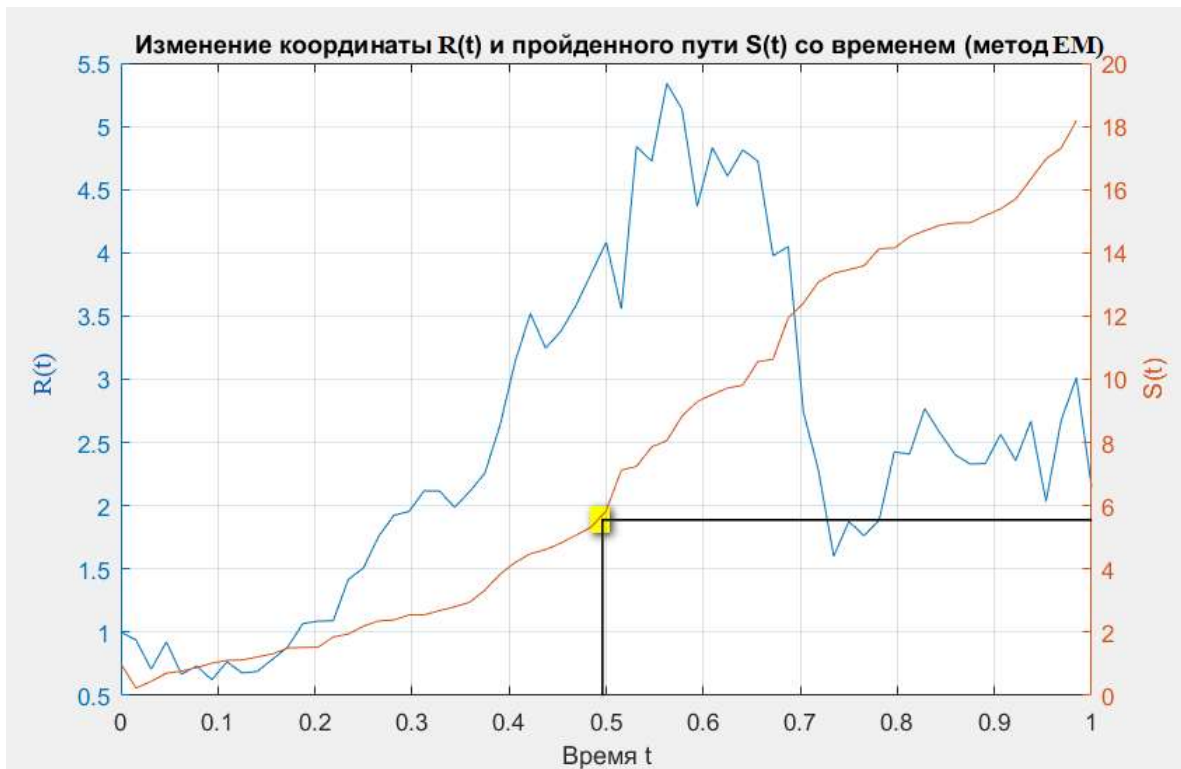
в) обробка даних – набір спеціальних функцій, включаючи побудову графіків, оптимізацію, пошук нулів, чисельне інтегрування та інше;

г) диференціальні рівняння – вирішення диференціальних і диференційно-алгебраїчних рівнянь, диференціальних рівнянь із запізнюванням, рівнянь з обмеженнями, рівнянь в часткових похідних та інше.

Код програми моделювання траєкторії у середовищі MATLAB наведений у додатку Б (точне рішення за методом БШ та чисельна апроксимація за методом ЕМЛ). Результати моделювання точної та апроксимованої траєкторії руху БПЛА як об'єкта броунівського руху з урахуванням «прогулянок Ліві» наведено на рис. 2.5, а.



а)



б)

Рисунок 2.5 – Моделювання траєкторії руху БПЛА: а – точне рішення за методом БШЛ (суцільна лінія) та апроксимація за методом ЕМЛ (штрихова лінія із зірочками); б – розрахунок довжини траєкторії за методом ЕМЛ

За горизонталлю наведений час польоту ($T=1$ дорівнює повному використанню заряду акумулятора та свідчить про необхідність дозарядки). За вертикаллю наведена просторова координата $R(t)$ та довжина траєкторії $S(t)$.

З порівняння рис. 2.4, а (модель Hamann H.) та рис. 2.5 видно суттєву різницю. В запропонованій моделі враховано зміна маршруту через обминання механічної перешкоди (будівлі). Таким чином, замість лінійного або броунівського руху був втрачений час, тому при лінійному русі відстань в $5,5 \cdot t$ була б подолана при витрачанні приблизно 0,5 заряду акумулятора.

Користуючись запропонованою моделлю, можливо визначити, яку лінійну відстань з урахуванням «прогулянки Леві» на обминання перешкоди подолає БПЛА DJI Phantom 4 у режимі «ATTI mode» (утримання висоти) на встановленій швидкості 54 км/год (див. технічні характеристики зазначеної моделі БПЛА у табл. А.2).

При паспортному часі витрати повного заряду акумулятора $T=28$ хв БПЛА має подолати відстань 26,8 км. Але, згідно з моделлю рис. 2.5, б, практично половина заряду акумулятора була витрачена на подолання всього третини лінійної відстані. З рис. 2,5, б випливає, що DJI Phantom 4 витратить весь заряд акумулятора вже через $\approx 65\%$ запланованого лінійного маршруту.

Користуючись розробленою моделлю та результатами розрахунків, можливо визначити, на який час буде скорочений політ БПЛА при різних зовнішніх збуреннях, Для цього, згідно з моделлю (2.12), необхідно змінювати коефіцієнт дрейфу λ при фіксованому коефіцієнті μ , що враховує стохастичний рух дрона.

З побудованого сімейства кривих пройденого шляху для одної прийнятої моделі БПЛА ($\mu = 1$) при сильному зустрічному вітрі ($\lambda=3$), попутному вітрі ($\lambda=0,5$) та при найбільш сприятливих умовах ($\lambda=1$, без вітру) випливає, що реальний час польоту в описаному вище режимі «АТТІ» при, наприклад, $\lambda=1,5$, становить вже не паспортні 28 хв, а 78% – тобто, 22 хв (див. маркер на Лінії 3 рис. 2.6). Такі дані співпадають з результатами натурального експерименту (реальному польоті DJI Phantom 4) з боковим вітром 3 м/с.

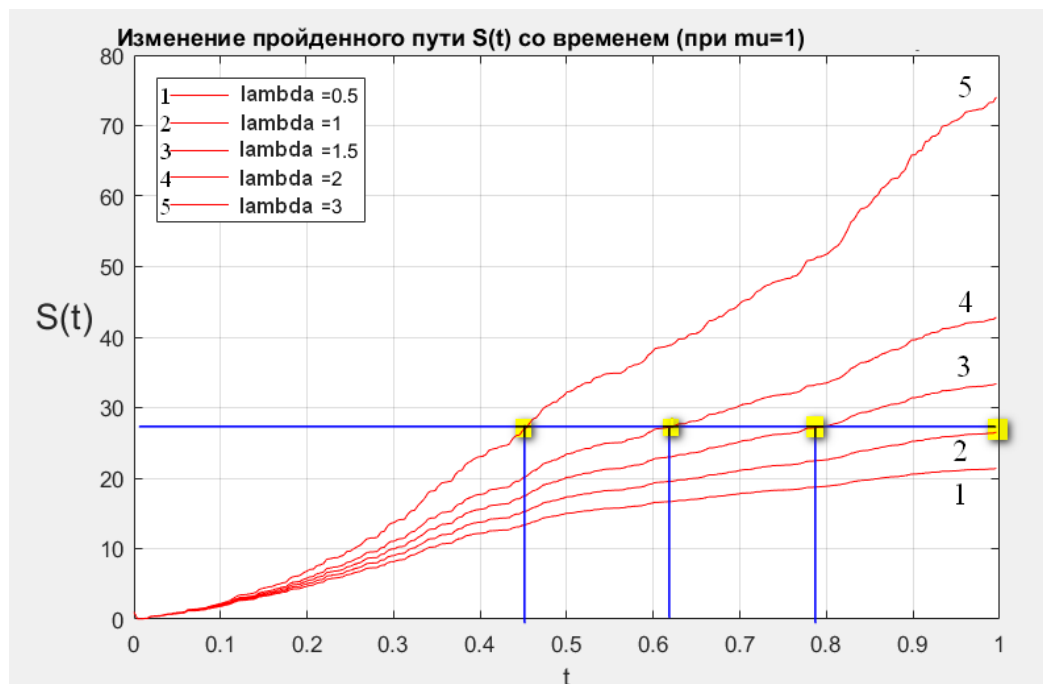


Рисунок 2.6 – Зменшення часу життя КФО в залежності від збурень ($\lambda=2$ при $v_{\text{БПЛА}}=15$ м/с та вітром 3 м/с)

Сімейство кривих довжини траєкторії вказаної моделі дрона на рис. 2.6 можна використовувати як номограму для визначення реального часу (жовті маркери), через який дрон треба відправляти на дозарядку в залежності від зовнішніх збурень. Наприклад, при сильному зустрічному вітрі ($\lambda=3$) акумулятор DJI Phantom 4 розрядиться вже через 45 % паспортного часу (тобто, через 12,5 хв), тому що за цей час дроном фактично буде пройдена траєкторія 26,8 км, передбачена для подолання в розглянутому режимі за цикл зарядки. При цьому реальна траєкторія польоту БПЛА буде чисельно дорівнювати довжині запланованого лінійного маршруту, але фактично пройдений лінійний маршрут буде суттєво менший.

Результати моделювання, наведені у додатку Б.1, підтверджуються даними експериментів, проведених з використанням БПЛА DJI Phantom 4 та наведеними у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Залежність реальної довжини траєкторії дрона від зовнішніх збурень (дрейфу) в абсолютних значеннях

Кратність зовнішнього збурення α	Змодельований реальний час польоту		Експериментальний реальний час польоту, хв	Траєкторія, км	
	% T	хв (для DJI 4)		точно рішення за БШЛ	апроксимація за моделлю ЕМЛ
1	100	28	28	26,50	26,19
1,5	0,78	22,4	23	33,40	32,96
2	0,62	17,3	18	42,79	42,18
3	0,45	12,6	13,5	74,04	72,73

Таким чином, запропонована модель траєкторії руху дрона з урахуванням зовнішніх збурень $\lambda = [0,5; 1; 1,5; 2; 3]$ на основі рівняння Ланжевена

та із залученням елементів теорії «польотів Лєві» надає можливість своєчасно вивести дрон з маршруту для дозарядки й тим самим запобігти його критичному застосуванню (навіть до втрати).

Аналогічні номограми можуть бути побудовані для дронів з іншими технічними параметрами (розмірами, ємністю акумуляторів та ін.)

За допомогою побудованої математичної та графо-аналітичної моделей стає можливим правильно визначати обсяг завдань для виконання дроном за один цикл до перезарядки. В результаті отримані траєкторій руху зграї з 4 БПЛА з використанням мікро-моделювання на основі запропонованих у попередніх пунктах математичних моделей без урахування та з урахуванням зовнішніх збурень (див. додаток Б.1).

Як правило, для моделювання руху дронів, що знаходяться в стані польоту, розглядають двовимірний простір. Але слід зауважити, що отримання результатів макро-моделювання передбачає витрачання достатньо великих обчислювальних ресурсів, тому такий підхід не є корисним при створенні та функціонуванні швидкодинамічних мереж, вузлами яких виступають малогабаритні БПЛА з обмеженими обчислювальними можливостями.

Чисельні та натурні експерименти показали, що результати мікро-моделювання у більшості випадків спроможні допомогти у попередніх оцінках часу, необхідного на виконання поставленої перед зграєю задачі, для розрахунку необхідних циклів перезарядки, особливо для гетерогенної мережі, де використовуються різні конструкції (моделі) дронів й т. і.

2.3.2 Мікро-моделювання руху БПЛА різного розміру

Для моделювання броуноподібного руху за рівняннями Ланжевена (2.8) розмір об'єкта руху α може бути врахований у коефіцієнті μ (аналогічному до коефіцієнту дифузії) при стохастичній складовій рівняння Ланжевена. Виходячи з того, що коефіцієнті μ аналогічний до коефіцієнту дифузії, можна зауважити, що чим більший розмір БПЛА, тим менше на нього вплив стохастичних процесів.

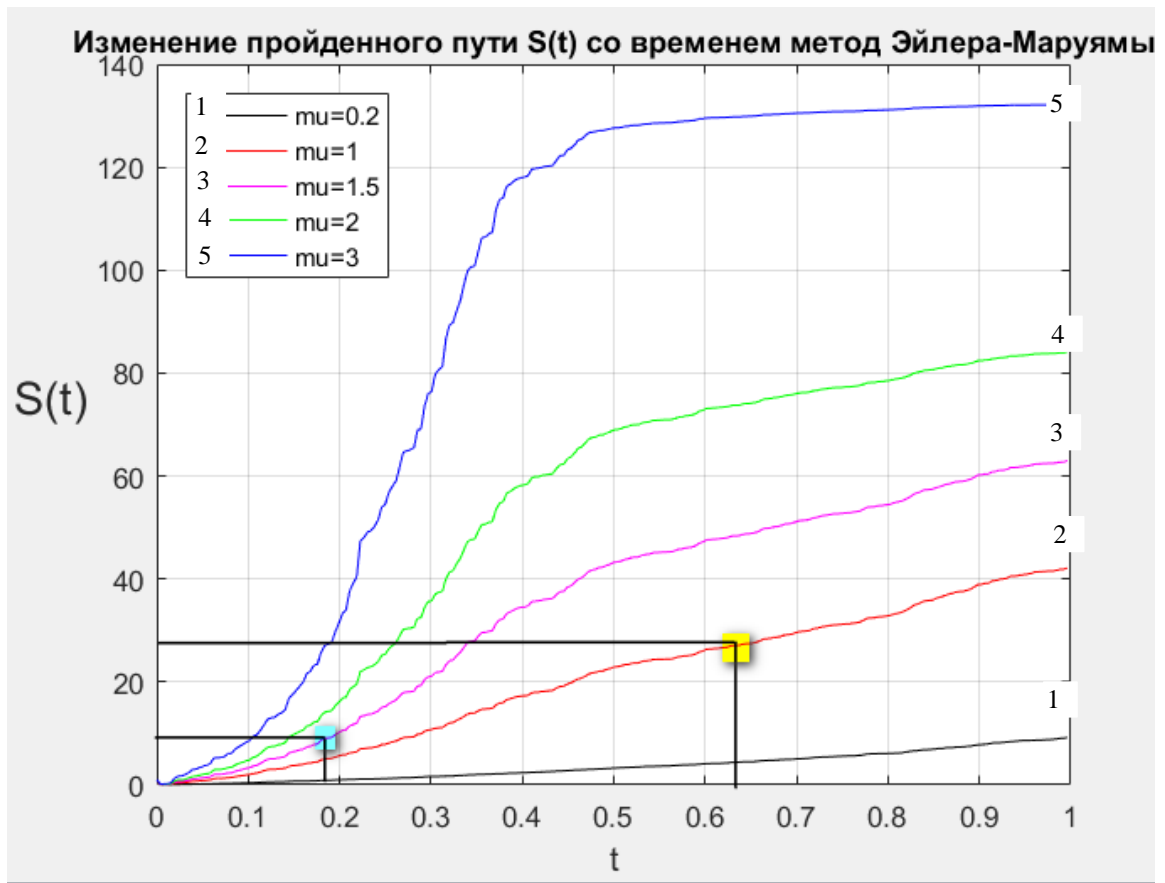
Тоді використаємо для моделювання масив $m_i = [0.2; 1; 1.5; 2; 3]$,

де $\mu = 1$ (червона лінія 2 на рис. 2.7) відповідає прототипному БПЛА Phantom 4, $\mu = 1,5$ (лілова лінія 3 на рис. 2.7) характеризує рух майже такого ж за розмірами, але менш потужного з досліджуваних БПЛА UDIRC LarkFPV (див. табл. А.2). Моделювання проводилось з урахуванням зовнішніх збурень $\lambda = 2$.

Зважаючи на те, що на горизонтальній осі за «1» прийнятий паспортний робочий час T акумулятора дрона DJI Phantom 4 ($\mu = 1$) з, за результатами визначення довжини пройденого шляху $S(t)$ можна побачити, що фактичний час життя становитиме лише $t_{\mu=1} = 0,62 \cdot T_{\mu=1}$. За цей час у режимі «АТТІ» дрон зазначеної моделі пройде шлях, що відповідає швидкості у цьому режимі (див. жовтий маркер на червоній лінії 2 рис. 2.7, б), повністю витратить заряд акумуляторів.



a)



б)

Рисунок 2.7 – Моделювання траєкторії руху БПЛА різних розмірів та потужності:

а – просторове переміщення, б – довжина маршруту

Аналогічно дрон меншої потужності в такому ж режимі витратить заряд акумулятора за час $t_{\mu=1,5} = 0,18 \cdot T_{\mu=1} \approx 5$ хв (блакитний маркер на ліловій лінії 3 рис. 2.7, б), хоча паспортний час життя становить 10 хв (див. табл. А.2). Це пояснюється тим, що з паспортною швидкістю режиму «АТТІ» 25 км/год дрон UDIRC LarkFPV пройде передбачений шлях в 4,2 км, подолавши суттєво меншу лінійну відстань через дрейф та стохастичні збурення, тому має бути направлений на перезарядку акумуляторів вже за 5 хв після початку польоту.

З аналізу результатів запровадження удосконаленого метода моделювання траєкторії руху системи БПЛА на основі стохастичних диференціальних рівнянь Ланжевена із застосуванням теоретичних засад «прогулянок Лєві» та «польотів Лєві» до моделювання траєкторії руху БПЛА (рис. 2.7) можна побачити, що

такий метод непридатний для БПЛА замалого розміру α або потужності ($\mu = 3$, синя лінія). Але у порівнянні з моделлю Наманн Н., результати якої наведені на рис. 2.4, у розробленій моделі (2.12), (2.18) для удосконаленого методу більш точно врахована стохастична складова руху системи БПЛА з урахуванням обминання несподіваних механічних перешкод та переривання маршруту з метою дозарядки акумуляторів.

2.3.3 Аналітична оцінка якості мікро-моделі траєкторії руху БПЛА

Визначення якості розробленої моделі ЕМЛ проводилось за нижченаведеними параметрами:

1. Модельна похибка:

$$\varepsilon_i = |R_{i\text{БШЛ}}| - |R_{i\text{ЕМЛ}}|, \quad (2.18)$$

де $R_{i\text{БШЛ}}$ – точне значення просторової координати БПЛА за моделлю Блека-Шоулза-Леві в i -й момент часу;

$R_{i\text{ЕМЛ}}$ – значення просторової координати, отримане за допомогою моделі ЕМЛ (2.11) в i -й момент часу.

2. Середньоквадратичне відхилення:

$$s = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^L \varepsilon_i^2},$$

де ε_i – модельна похибка в i -й момент часу, яка визначається за формулою (2.18);

L – тривалість періоду прогнозування інтервалів дискретизації.

3. Середній відсоток похибки:

$$AvEr = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{\varepsilon_i}{|R_{i\text{БШЛ}}|} \times 100 \%.$$

4. Середня відносна похибка прогнозу:

$$AvRelEr = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{|\varepsilon_i|}{|R_{i\text{БШЛ}}|} \times 100 \%.$$

5. Коефіцієнт детермінації:

$$KDet = \frac{\sum_{i=1}^L (|R_{iEMЛ} - \langle R \rangle|)^2}{\sum_{i=1}^L (|R_{iБШЛ} - \langle R \rangle|)^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L \varepsilon_i^2}{\sum_{i=1}^L (|R_{iБШЛ} - \langle R \rangle|)^2},$$

де $\langle R \rangle = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L |R_{iБШЛ}|$.

6. Індекс нерівномірності Тейла:

$$InT = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^L \varepsilon_i^2}{\sum_{i=1}^L R_{iБШЛ}^2 + \sum_{i=1}^L R_{iEMЛ}^2}}.$$

Отримані результати наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Оцінка якості моделювання з використанням запропонованої моделі на основі рівняння Ланжевена з урахуванням «прогулянок Лєві»

Середнє квадратичне відхилення (нормоване)	0,146
Середній відсоток похибки, %	8,2
Середня відносна похибка прогнозу, %	16,8
Коефіцієнт детермінації	0,41
Індекс Тейла	0,13

На підставі отриманих результатів щодо якості розробленої моделі ЕМЛ можна зробити висновок щодо доцільності застосування запропонованої моделі (2.12) до прогнозування траєкторії руху БПЛА.

Застосування чисельних методів більш високих порядків веде до різкого зростання необхідних обчислювальних ресурсів, при цьому точність прогнозу може змінюватися незначно.

2.4 Особливості побудови моделі при розробленні ройових алгоритмів

Кількість методів, доступних для моделювання роїв, дуже велика. Тому повний огляд їх усіх є складним і практично неможливим. Наведемо декілька найбільш характерних кроків з вибору параметрів моделі.

Першим кроком у визначенні методології є вибір між алгоритмічним (симуляційним) та символічним (аналітичним) підходом. Зазвичай алгоритмічні засоби представляють мікроскопічні підходи у ройовій робототехніці. Проте, сьогодні алгоритмічно можна реалізувати і макроскопічні підходи при наявності досить потужних обчислювальних ресурсів.

Другий крок у визначенні методології є вибір між дискретним та неперервним просторовим представленням. Найпоширенішими є ті моделі, які представляють простір стандартним, як правило, регулярним способом (наприклад, квадратними або гексагональними сітками). Якщо необхідно скоротити кількість обмежень, обирають неперервний простір, оскільки потенційно він відповідає цим вимогам.

Третій крок полягає у виборі між дискретним або неперервним часом. Неперервний підхід обирають, щоб уникнути додаткових обмежень. В такому разі застосовують аналітичний підхід, хоча він може бути і більш складним, ніж дискретний за часом підхід. Але аналітичний підхід має обмежену значимість у фактичній реалізації, враховуючи невелику обчислювальну потужність безпосередньо на борту робототехнічних об'єктів.

При застосуванні до роїв дронів фізичного підходу на основі рівняння Ланжевена слід враховувати, що дрони є автономними, на відміну від природних частинок, які просто реагують на зовнішні сили і самі не приймають рішення, щодо подальшого руху.

Рух рою дронів розподіляється на два типи: по-перше, дрон виконує рух за типом випадкової «прогулянки Лєві»; по-друге, він рухається в напрямку, який визначається у результаті обробки інформації, наданої навколишнім оточенням. Взагалі, є три причини для випадкового руху (рис. 2.8):

- 1) для дрона немає ніякої інформації, тому він має рухатися випадковим чином;
- 2) інформація доступна, але автономний дрон вирішує переміститися випадковим чином, замість того, щоб використовувати цю інформацію;
- 3) інформація доступна, і дрон хотів би рухатися згідно з нею, але через

фізичні обмеження, наприклад, інший дрон або перешкода блокує його шлях, необхідно вибрати випадковий напрямок, щоб продовжити рух і уникнути тупикової ситуації.

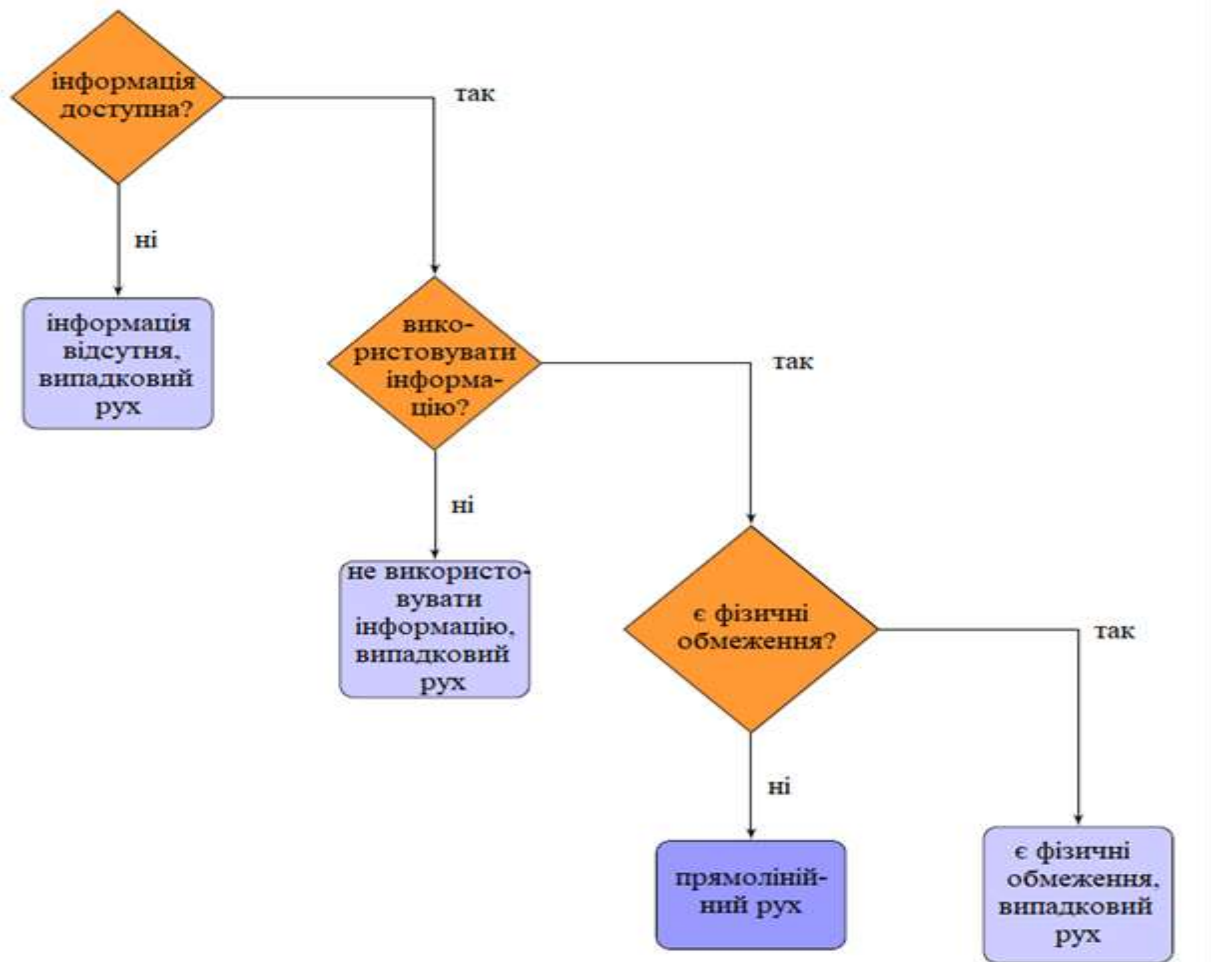


Рисунок 2.8 – Процедура випадкового руху

У випадку браку інформації необхідно знати потенційне джерело інформації:

- якщо брак інформації виникає через відсутність характеристик оточуючого середовища, його можна моделювати за допомогою моделі середовища;

- якщо брак інформації пов'язаний з відсутністю повідомлення від іншого БПЛА, то застосовується модель зв'язку;

- якщо брак інформації пов'язаний з відсутністю сусіда, то рух можна моделювати за допомогою ймовірності події «немає сусіда».

У випадку, коли доступна інформація не використовується внаслідок автономного рішення БПЛА, то основний курс БПЛА може бути отриманий з алгоритму управління і включений в детермінований та недетермінований вид руху моделі.

У випадку фізичних обмежень (поведінка запобігання зіткненням) спосіб моделювання залежить, як і у випадку відсутності інформації, від причини цього обмеження, яке може бути або особливістю оточення, або іншим БПА.

Можна припустити, що всі види випадкового руху добре моделюються процесами дифузії: час від часу руху БПЛА перериваються зіткненнями один з одним. Такі зіткнення можуть інтерпретуватися як зіткнення частинок, тому що обидва БПЛА змінять напрямок свого руху після зіткнення. Проте фактичного зіткнення не буде, оскільки БПЛА запрограмовані так, щоб відвернути один від одного, перш ніж наблизитися занадто близько. Кут повороту при цьому можна вважати випадковим через складні процеси, що лежать в основі роботи датчиків і через неточність власне самих БПЛА.

Таким чином, дрони в місцях їх високої щільності зіштовхуються багато разів, доки вони не виберуть напрям, який випадково виведе їх з купи. Отже, відповідно до дифузійного процесу, БПЛА, як правило, віддаляються від областей, які переповнені іншими БПЛА, в малозаселені області. Використовуючи ці припущення, дифузія добре описує випадковий компонент руху рою БПЛА, які мають достатню кількість зіткнень.

Проте, зі зменшенням середньої щільності БПЛА і зменшенням кількості зіткнень, цей підхід стає все більш неточним. Це вірно, крім випадків, коли детермінований рух приводить до рівномірного розподілу БПЛА у просторовому коридорі. Тоді зіткнення дійсно не є причиною процесу рівномірного розподілу, але процес дифузії може все ще бути варіантом моделювання.

На рис. 2.9 наведено схему, яка демонструє підхід, оснований на моделюванні.

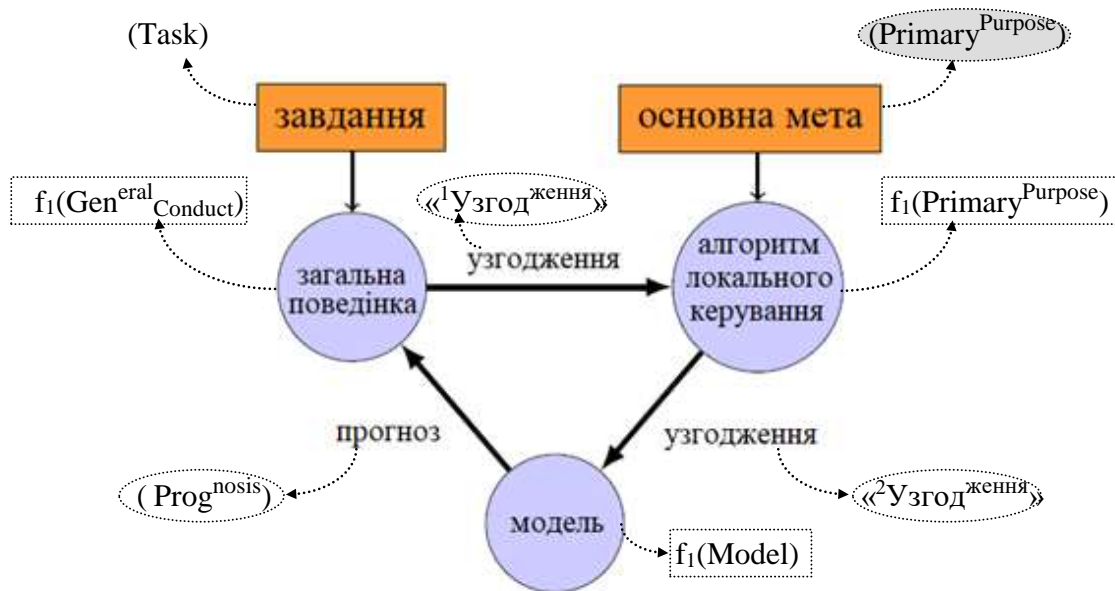
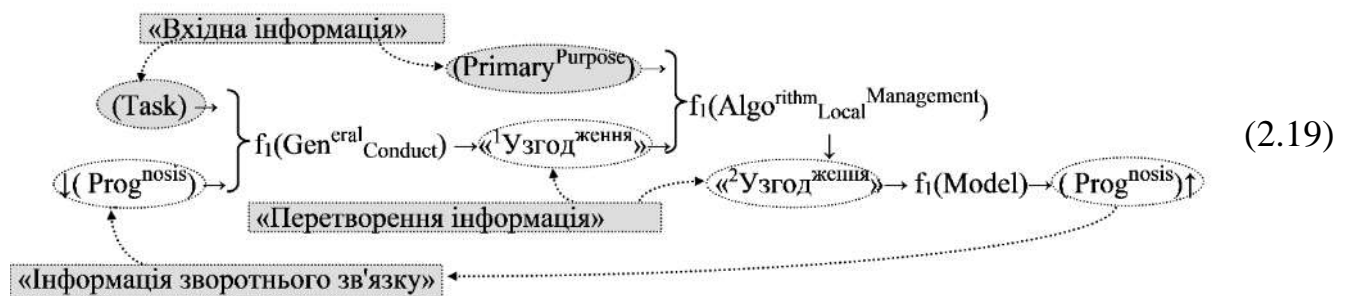


Рисунок 2.9 – Схема підходу, оснований на моделюванні

Наведена схема як графо-аналітичний вираз виглядатиме:



де $f_1(\text{Gen}^{\text{eral}}_{\text{Conduct}})$ – функціональна структура спільної поведінки з «Вхідною інформацією» для спільного завдання (Task) та з «інформацією зворотного зв'язку» $\downarrow(\text{Prog}^{\text{nosis}})$, котра активізує першу «Перетворену інформацію» « 1 Узгодження»;

$f_1(\text{Algo}^{\text{rithm}}_{\text{Local}}_{\text{Management}})$ – функціональна структура алгоритму локальної поведінки з «Вхідною інформацією» про основну ціль ($\text{Primary}^{\text{Purpose}}$) і першою «Перетвореною інформацією» « 1 Узгодження», котра активізує другу «Перетворену інформацію» « 2 Узгодження»;

$f_1(\text{Model})$ – функціональна структура моделі з другою «Перетвореною інформацією» « 2 Узгодження», котра активізує «Інформацію зворотного зв'язку» ($\text{Prog}^{\text{nosis}}\uparrow$).

Таким чином, на початку побудовання моделі маємо два обмеження: одне

– визначене завдання ($\text{Primary}^{\text{Purpose}}$), друге – основний алгоритм, оскільки він обмежує доступну глобальну поведінку (див. рис. 2.8).

Якщо набір можливих варіантів поведінки, які визначені завданням, і тих варіантів, які визначаються базовим алгоритмом, збігаються, то задача може бути вирішена за базовим алгоритмом. Однак фактичний алгоритм управління та конфігурація параметрів залишаються невідомими. На основі базового алгоритму може бути розроблена модель, яка, в ідеалі, включає ці параметри безпосередньо. В іншому випадку необхідно визначити «²Узгод^{ження}», яке співвідносить параметри алгоритму з параметрами моделі, і навпаки. Іншою властивістю алгоритму може бути модульна форма, яка може привести до модульно-орієнтованої моделі та спростити дизайн моделі.

Точна модель прогнозує глобальну поведінку, яку слід очікувати на основі даного алгоритму. Виходячи з цих прогнозів, параметри алгоритму або сам алгоритм самостійно корегуються (є ітеративним). Таке корегування потрібно зробити і для моделі. Друга ітерація починається з повторного використання моделі ще раз для отримання прогнозів поточного алгоритму. Це повторюється до тих пір, доки глобальна поведінка, яку передбачає модель, не стане задовільною.

Така оцінка поведінки може бути зроблена за допомогою визначеної формальної метрики (наприклад, щільності БПЛА у важливих областях) або неформально (наприклад, суб'єктивна оцінка нових виникаючих закономірностей). В ідеальному випадку оцінка продуктивності може базуватися лише на параметрах. Якщо модель може автоматично адаптуватися до нових параметрів і є обчислена метрика, то весь процес може бути автоматизований для пошуку оптимальних у просторі параметрів алгоритму. Проте, як правило, корегування моделі є досить складним процесом і потребує наявності людини в якості розробника моделі. Крім того, можуть знадобитися деякі симуляції або навіть експерименти з кількома БПЛА для вимірювання параметрів макрорівня та адаптації моделі. У якості макропоказників для числового моделювання руху БПЛА можна розглядати:

- густину середовища, в котрому рухається об'єкт (за аналогією з броунівської часткою), кг/м^3 ;
- температуру середовища, $^{\circ}\text{C}$
- тиск середовища, ат. або кПа ;
- концентрацію (щільність) об'єктів, к-ть/од. об'єму ;
- ін. параметри.

Висновки до Розділу 2

1. Вперше запропоновано метод визначення зменшення часу життя ШГКМ критичного застосування за рахунок обчислення траєкторії руху з урахуванням відхилень через зовнішні збурення, що надає можливість попередити втрату БПЛА, своєчасно знімати дрони з маршруту та відправляти на базу для підзарядки батарей.

2. Удосконалено метод моделювання траєкторії БПЛА на основі стохастичних диференціальних рівнянь Ланжевена для броунівського руху за рахунок застосування «прогулянок Лєві»/«польотів Лєві», фінансової моделі Блека-Шоулза з описом їх у графо-аналітичній формі з врахуванням функціональних блоків БПЛА, що дозволяє враховувати у траєкторії БПЛА механічні перешкоди та зовнішні збурення. Показано, що середній відсоток похибки такої моделі складає 8,2 %, тому запропоновану вдосконалену модель доцільно застосовувати до прогнозування траєкторії руху БПЛА.

3. Запропоновані теоретичні та методологічні рішення перевірені результатами чисельного моделювання у середовищі MATLAB. Побудована неперервна просторово-часова модель гетерогенної зграї з 5 БПЛА двох конструкцій, які виконують розподілену технологічну задачу за складними геометричними траєкторіями, що не можуть бути описані математичними залежностями.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ БПЛА У ПРОСТОРОВИХ КОРИДОРАХ

3.1 Визначення території виконання завдання групою БПЛА та постановка задачі планування маршруту

Підходи до управління групою БПЛА своїми складовими схожі на ті, що використовуються для управління одиночними дронами, за тією відмінністю, що при використанні групи пристроїв необхідно виконати ті самі операції управління, але вже для більшої кількості об'єктів системи та враховувати їх взаєморозташування. Оскільки ШГКМ найчастіше використовуються з метою дослідження великих територій, тому є важливим вірно оцінити задачу, вибрати необхідну кількість та характеристики дронів, побудувати маршрути для кожного об'єкта зграї та забезпечити систему делегування завдань при критичній ситуації (наприклад, при втраті одного або декількох дронів, тощо).

Основною задачею більшості рухомих мереж є вирішення задач моніторингу. Тому, окрім безпосереднього управління фізичними пристроями, система управління такою мережею повинна також виконувати функції інтеграційного шару між людиною та КС.

Система управління (СУ) повинна надавати відповідний інтерфейс для сторонніх програмних рішень, через який будуть надходити задачі для груп пристроїв.

Для цього потрібно розробити механізми класифікації вхідних та вихідних даних моніторингу, методи та алгоритми їх аналізу та обробки. Цільова задача для РММ повинна бути представлена у вигляді, який може бути зрозумілий СУ.

Основним підходом для вирішення проблем позиціонування пристрою в просторі є використання БПЛА навігаційних систем, наприклад, таких як GPS. Дана система може забезпечити доволі точне позиціонування пристрою в просторі. Ще однією перевагою даної технології є її широке використання, безкоштовність та можливість управління точністю позиціонування за

допомогою налаштування технічних характеристик модулів [331, 261]. Наразі навігаційні системи використовуються в багатьох безпілотних проектах, таких як SmartAP, ArduPilot, 3DR SOLO Drone та інші.

Виходячи з цього виглядає доцільним використання координат GPS як вхідних даних при постановці завдання для моніторингової мережі.

В той же час, просто набір координат не може служити повноцінним та однозначним описом задачі, тому необхідно розробити підхід формалізації задач моніторингу.

Постановка задачі визначення способу обходу заданої території наведена нижче. Вихідні дані:

- характеристики БПЛА;
- мета спостереження, задана географічними координатами кутових точок;
- вид мети (точкова, лінійна або замкнений контур).

Вимагається:

- побудувати суб-оптимальну траєкторію покриття мапи місцевості.

Траєкторія визначається координатами точок, над якими повинен пролетіти БПЛА.

Існує три принципово різні типи завдань для РММ:

- завдання слідування лінійним маршрутом (рис. 3.1);
- завдання моніторингу замкнутого контуру (площинний, рис. 3.2);
- завдання відвідування контрольних точок (рис. 3.3).

Тип завдання визначається в залежності від форми і розмірів території, а так само від розмірів видимої для сенсорів БПЛА області, залежить від поточного режиму переміщення.

Побудова траєкторії обходу точкових і лінійних об'єктів значно простіша ніж площинних. Обхід точкових об'єктів зводиться до пересування по них, а до лінійних – пересування уздовж них.

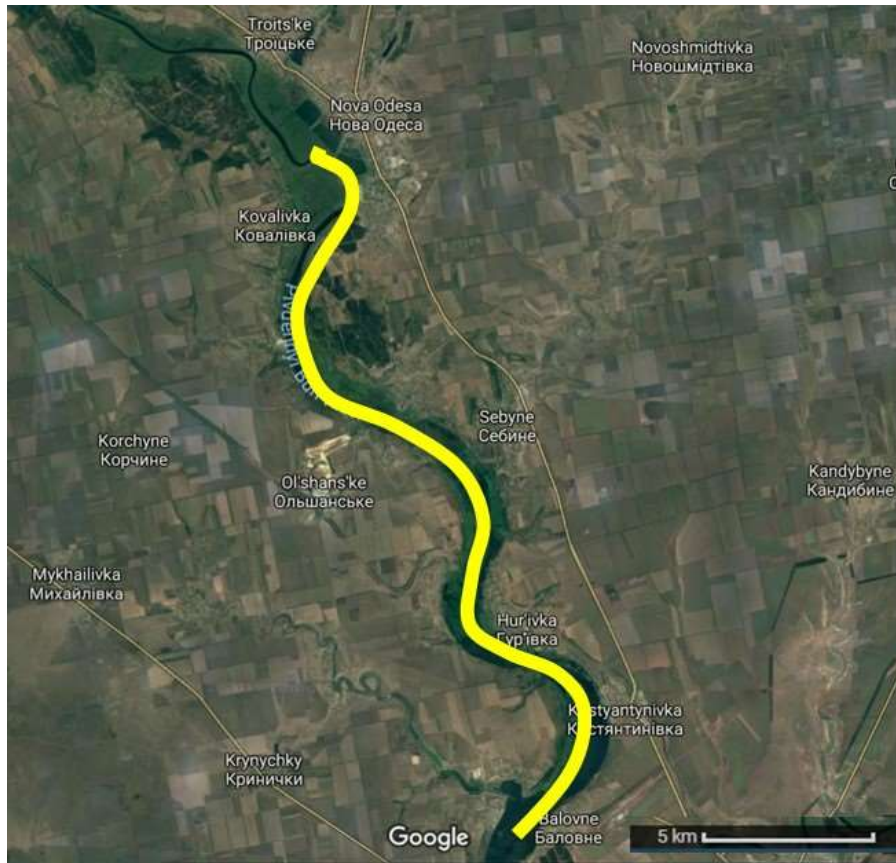


Рисунок 3.1 – Приклад завдання слідування за лінійним маршрутом

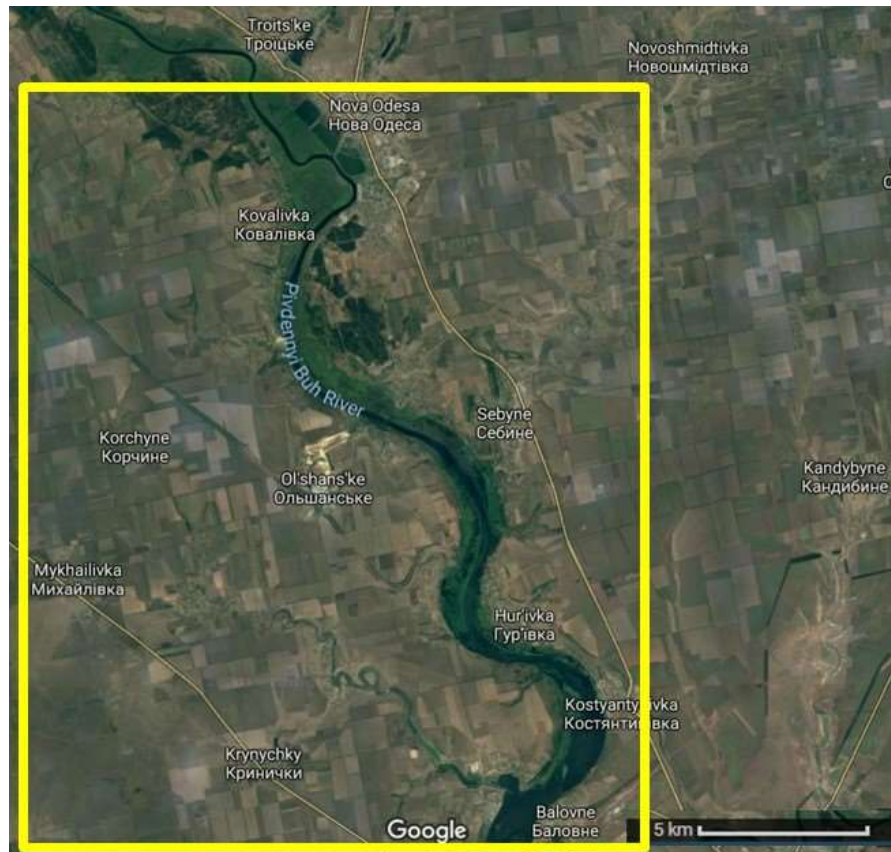


Рисунок 3.2 – Приклад завдання із замкненим контуром

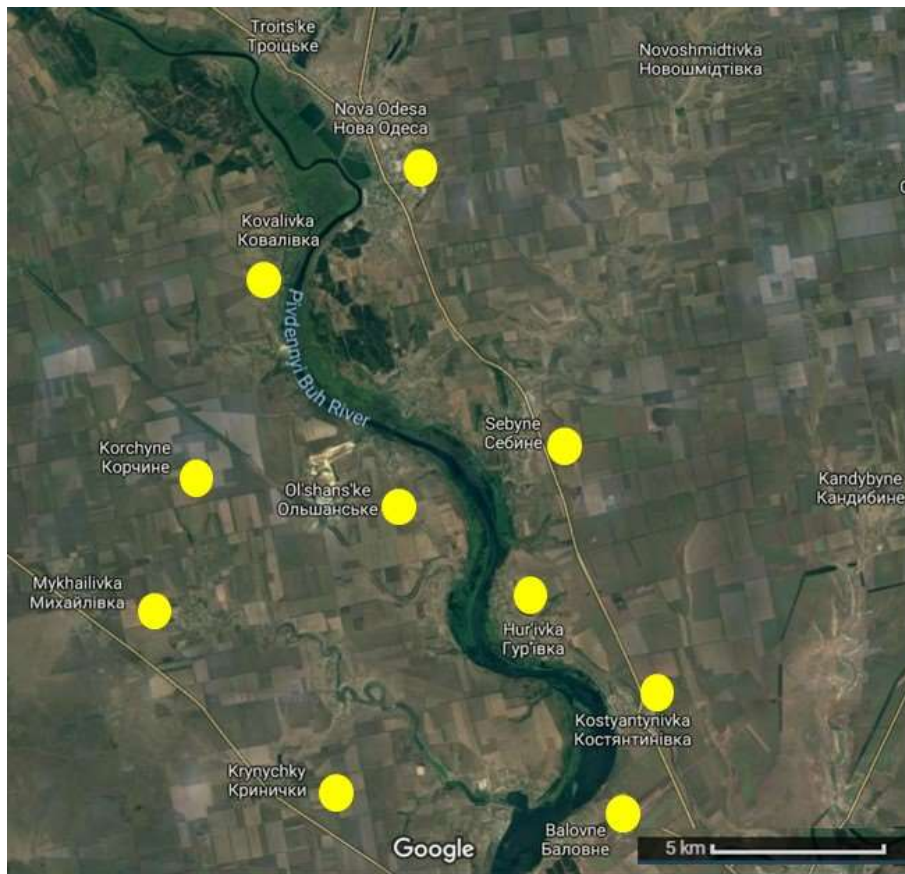


Рисунок 3.3 – Приклад завдання з контрольними точками

Виходячи з досвіду використання БПЛА, прийmemo наступні міркування:

- траєкторія проходу повинна бути простою (для полегшення обробки одержуваних даних з БПЛА та орієнтації дрона);
- траєкторія повинна бути циклічною (для можливості поширювати цикли деякої одиничної площі на площі довільних форм).

Площу покриття можливо представити у вигляді смуги, середня лінія якого є траєкторією проекції оптичної осі датчика БПЛА, що знімає показання навколишнього середовища. Накопичений досвід використання БПЛА передбачає форму траєкторії у вигляді «змійки» (рис. 3.4), що відповідає прийнятим вище міркуванням.

Оптимальна траєкторія обльоту площинної цілі характеризується мінімальною довжиною серед інших траєкторій, а також мінімальним числом розворотів над ціллю і відповідно великою кількістю прямих ділянок.

Для площинних цілей, представлених опуклими багатокутниками, мінімальна кількість розворотів, а також мінімальна довжина траєкторії буде

досягтися тоді, коли прямі ділянки секторів спостереження будуть паралельні прямій між двома найбільш віддаленими вершинами багатокутника.

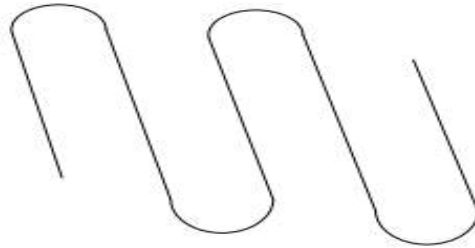


Рисунок 3.4 – Найпростіший вид траєкторії обльоту замкненого контуру

Кожна з таких задач вимагає окремого підходу для вирішення задачі планування маршруту кожного елемента мережі.

Завдання планування маршруту обходу групою БПЛА множини цілей ставиться наступним чином [335, 285].

Вихідні дані:

- кількість БПЛА і їх значущі характеристики (координати початкового місцеположення, діапазон швидкостей, дальність польоту, кут огляду, мінімальний радіус розвороту);

- кількість цілей і їх значущі характеристики (мета спостереження, задана географічними координатами кутових точок і видом мети (лінійна, площинна або точкова).

Вимагається:

- розробити критерій якості планування обльоту групою БПЛА множини цілей.

Завдання планування обходу може бути сформульована в термінах теорії прийняття рішень, теорії комбінаторної оптимізації, зокрема, теорії розкладів та інших. При використанні будь-якого формалізму завдання передбачає велику розмірність простору рішень. Розподіл цілей між БПЛА, послідовність проходження кожним БПЛА підмножини цілей, спосіб переміщення до кожної мети, спосіб її моніторингу – це все параметри, які визначають величезну

кількість варіантів рішень задачі планування навіть при урахуванні всіх обмежень.

В якості критерію ефективності пропонується використовувати нормований час обльоту всіх цілей з урахуванням обмеженого заряду акумуляторних батарей БПЛА 1-го та 2-го класу. Функція оптимізації ефективності дискретна і немонотонна у своїй області визначення і має велику кількість локальних екстремумів. Іншими словами, стоїть завдання оптимізації дискретної функції в багатовимірному дискретному просторі векторів рішень з урахуванням численних обмежень.

Для вихідної задачі планування доцільно виконати декомпозицію на три суб-задачі з метою значного зменшення розмірності області визначення:

а) завдання верхнього рівня – завдання призначення. В ньому потрібно розподілити безліч цілей у групі БПЛА (отримання значення цільової функції передбачає рішення задачі середнього рівня);

б) завдання середнього рівня вимагає для кожного БПЛА визначити послідовність проходження призначеної йому на верхньому рівні групи цілей (ця задача зводиться до задачі комівояжера);

в) завдання нижнього рівня потребує визначити суб-оптимальний маршрут проходження цілі одним БПЛА.

Дану задачу можна представити, як модифіковану задачу транспортної маршрутизації з навантаженням (Capacitated Vehicle Routing Problem). Нехай визначено неорієнтований граф $G = (V, E)$, де множина вершин $V = \{0, 1, \dots, n\}$ – це множина цілей; E – множина ребер. Кожній вершині назначено відповідну вагу

$$d_k, k = \overline{0, n}. \quad (3.1)$$

Вершина з індексом «0» є базою, з якої стартують всі БПЛА, представлені множиною $Q = \{0, 1, \dots, n\}$, де кожний БПЛА має обмеження по вазі маршруту

$$R_l, l = \overline{0, m}. \quad (3.2)$$

Кожне ребро $E_{i,j}$ має невід'ємну вагу $c_{i,j} = c_{j,i}$.

Тоді необхідно визначити безліч маршрутів БПЛА з мінімальною загальною вагою

$$W = \sum_0^m w_l,$$

таких щоб кожен маршрут починався і закінчувався на «базі», а кожна ціль відвідувалася лише один раз

$$w_l = \sum_0^{r+1} c_i + \sum_0^r d_i, \quad (3.3)$$

де w_l – сумарна вага маршруту кожного БПЛА;

$\sum_0^{r+1} c_i$ – вага всіх $r + 1$ ребер у маршруті;

$\sum_0^r d_i$ – вага всіх r вершин. Причому, $w_l \leq R_l$.

Таким чином, ваги вершин $d_k, k = \overline{0, n}$ відображають витрати на обхід конкретної мети і є шляхом розв'язання задачі нижнього рівня.

Задача верхнього рівня вирішується шляхом розрахунку необхідної кількості елементів групи виходячи з їх характеристик. Нехай відомі такі параметри: загальна площа для виконання завдання зграєю БПЛА (S_{all}), відстань від бази до цілі (l), характеристики БПЛА (швидкість v , запас енергії акумулятора тощо); продуктивність (P).

Для того, щоб скоротити час виконання задачі, необхідно вирахувати мінімальний час виконання завдання для кожного БПЛА, а потім зкомплектувати ними групу. Таким чином, оптимальним рішення цієї задачі є

$$D_{coef} = t_{mt} + t_{mb} + t_{op}, \quad (3.4)$$

де t_{mt} – час пересування до цілі;

t_{mb} – час пересування від цілі;

t_{op} – час виконання задачі.

Таким чином, моніторингова група буде формуватися за алгоритмом, наведеним на рис. 3.5. Загальний алгоритм вирішення задачі управління групою БПЛА зображено на рис. 3.6.

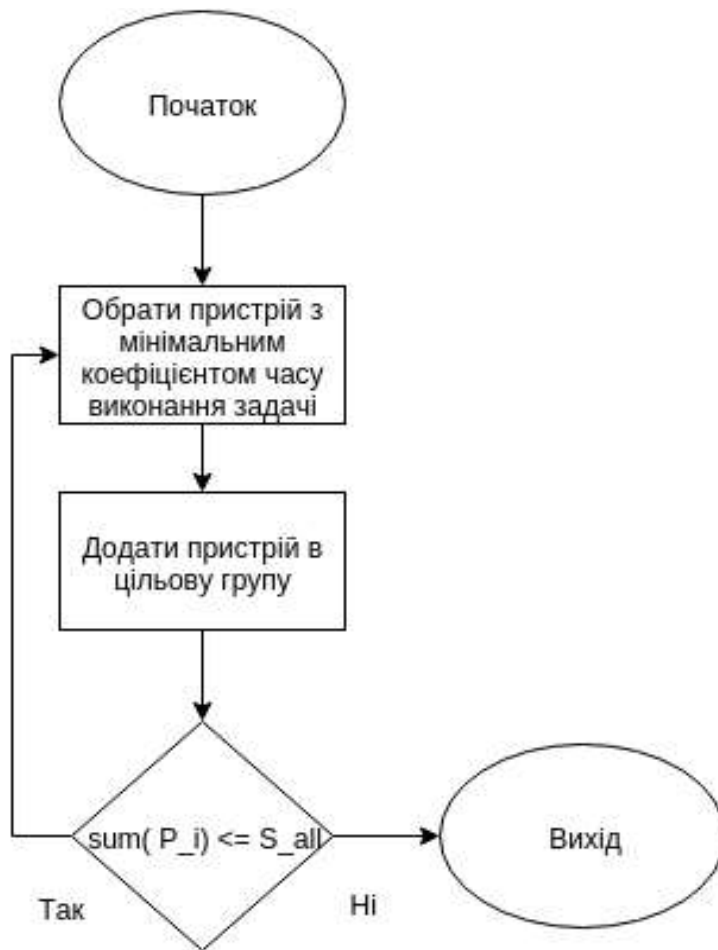


Рисунок 3.5 – Алгоритм розподілу групи пристроїв



Рисунок 3.6 – Алгоритм вирішення задачі управління групою БПЛА

Після дослідження специфіки задач моніторингу було зроблено висновок, що всі території з замкнутим контуром характеризуються наявністю граничних меж площі моніторингу, що може бути використане для побудови моделі виконуваного завдання. Територія виконання завдання може мати будь-яку

форму – як правильну, так і у формі багатогранника. Для зменшення енергозатрат системи моніторингу доцільно розробити методи спрощення виконуваного завдання. Наприклад, опис завдання, який надходить до системи управління, має наступну структуру (рис. 3.7):

```
{
  "description": "Check quad area",
  "status": "opened",
  "added": "1",
  "values": [
    {"latitude": 46.9662232, "longitude": 32.0071447, "height": 100, "direction": "N"},
    {"latitude": 46.9662242, "longitude": 32.0071447, "height": 100, "direction": "W"},
    {"latitude": 46.9662242, "longitude": 32.0071437, "height": 100, "direction": "S"},
    {"latitude": 46.9662232, "longitude": 32.0071437, "height": 100, "direction": "E"},
    {"latitude": 46.9662232, "longitude": 32.0071447, "height": 100, "direction": "N"}
  ],
  "drone_id": 1
}
```

Рисунок 3.7 – Опис завдання, що надходить до системи управління

Тобто, для того що отримати спрощену модель зазавдання, необхідно знайти координати крайньої північної, південної, східної та західної точок. Приклад спрощення опису території виконуваного завдання показано на рис. 3.8.

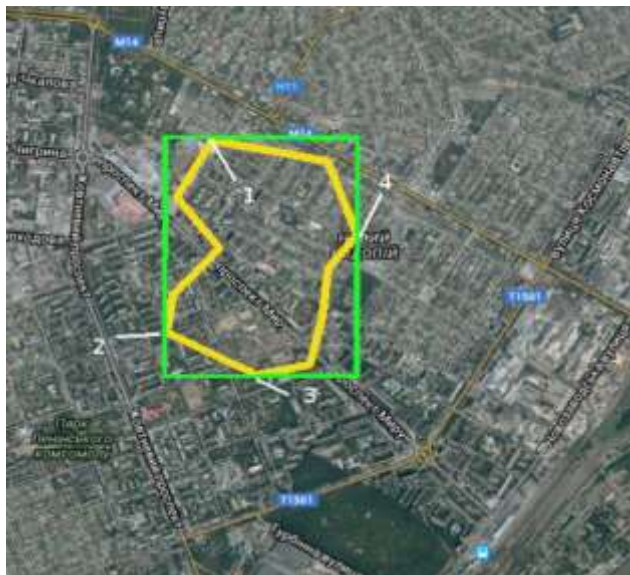


Рисунок 3.8 – Приклад спрощення опису території виконуваного завдання:

- 1 – крайня північна точка;
- 2 – крайня західна точка;
- 3 – крайня південна точка;
- 4 – крайня східна точка

Таким чином отримана спрощена форма території виконуваного завдання, що дозволить моніторинговим пристроям зменшити витрати на переміщення, а системі управління – витрати часу на обробку опису форми території виконуваного завдання.

Наступною задачею є визначення області інтересу для кожного з суб-роїв зграї. Дану проблему було вирішено шляхом розбиття загальної площі області інтересу на сектори.

Для ефективного виконання задач моніторингу СУ необхідно оперувати як інформацією про завдання, так і про пристрої, які знаходяться під її управлінням. Використовуючи наявну інформацію можливо визначити, яку площу може моніторити той чи інший пристрій, і, виходячи вже з цього, розподілити виконуване завдання між секторами мапи місцевості та сформувати моніторингову групу, розділивши зграю на суб-рої. Приклад розподілу території виконуваного завдання на сектори між чотирма суб-роями моніторингової мережі показано на рис. 3.9.

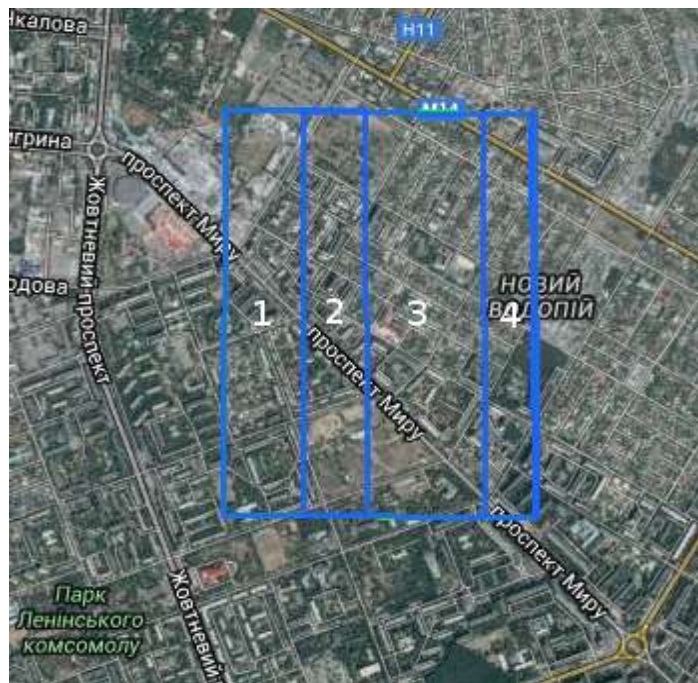


Рисунок 3.9 – Приклад розподілу території виконуваного завдання на сектори 1, 2, 3, 4 (області функціонування кожного суб-рою зграї)

Розподіл території виконуваного завдання на сектори залежить від фізичних можливостей апаратних платформ, таких як час автономного польоту, площа захоплення моніторингових даних й т. п.

3.2 Метод визначення площі функціонування зграї БПЛА на основі прямокутника Брахмагупти

3.2.1 Топології РММ на основі БПА, розосереджених у двовимірному просторі

За результатами аналізу існуючих варіантів конструкцій БПА [126, 51, 115] були узагальнені графічні позначення різних типів БПА, як наведено на рис. 3.10.



Рисунок 3.10 – Варіації конструкцій БПА

Зважаючи на те, що найбільш розповсюдженими є безпілотні літальні апарати (БПЛА), надалі в аналізі та дослідженні будуть розглядатись саме вони, поєднані у так звану «зграю» БПЛА. Але слід зазначити, що усі отримані результати можуть бути використані також стосовно строю БПА будь-якого конструктивного виконання.

Вбачається, що зграя розбита на суб-рої, кожен з яких працює у виділеному просторовому коридорі для виконання своєї частини загального завдання. Для вирішення задач розміщення БПЛА у просторі та виконання ними функцій серверів (операторів) та клієнтів для передачі, обробки і зберігання інформації можливо використовувати такі топології гетерогенної РММ на основі розосереджених БПЛА різних конструкцій у двовимірному просторі:

– Зірка (рис. 3.11).

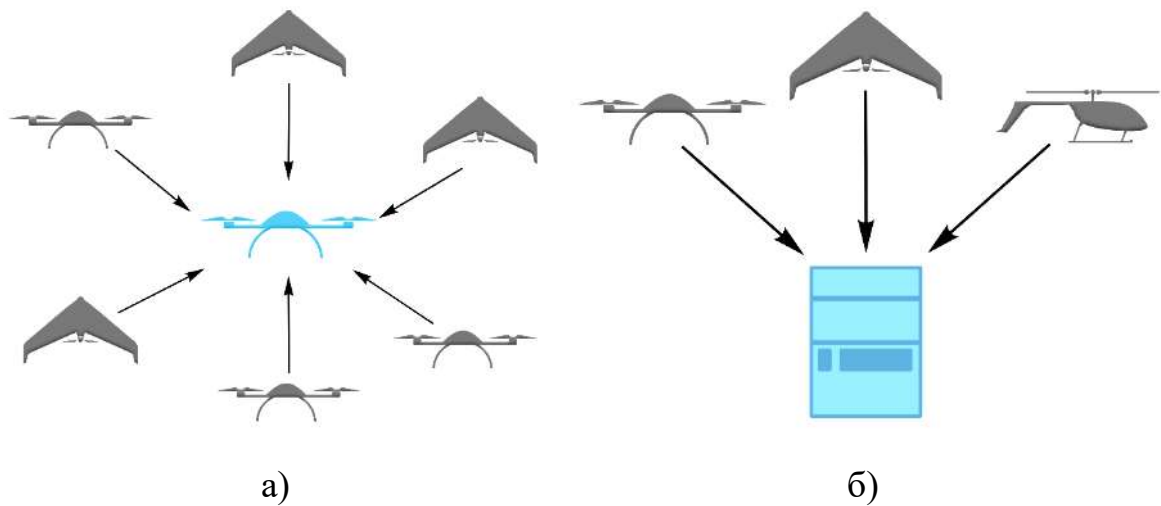


Рисунок 3.11 – Топологія «зірка»: а – з БПЛА у якості сервера; б – з наземним сервером

У центрі такої топології РММ знаходиться або головний дрон, або наземний оператор, що слугують для обробки і збереження зібраних даних. До центральної серверної одиниці приєднуються дрони-клієнти, що збирають необхідну для сервера інформацію;

– *Кільце* (рис. 3.12).

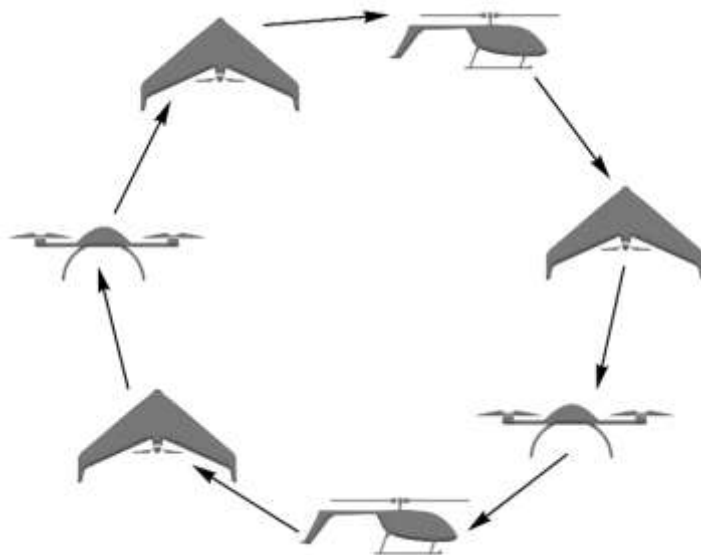


Рисунок 3.12 – Топологія «кільце»

Топологія описує круговий зв'язок між дронами, що отримують на вхід і видають певні дані, для забезпечення неперервної передачі інформації по замкнутому колу між об'єктами збору і обробки файлів;

– Шина (рис. 3.13).

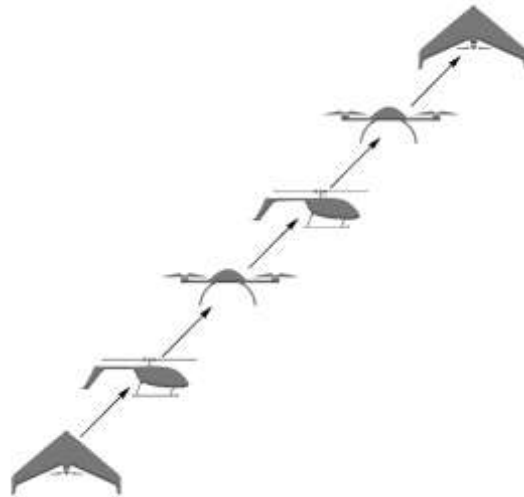


Рисунок 3.13 – Топологія «шина»

Передача інформації у даній топології РММ відбувається по чергово від одного крайнього дрона до сусіднього, шляхом проходження усього ланцюжка проміжних клієнтів. Всі дрони, крім крайніх, виконують роль точок трансферу даних (ретрансляторів);

– Ієрархічна зірка (рис. 3.14).

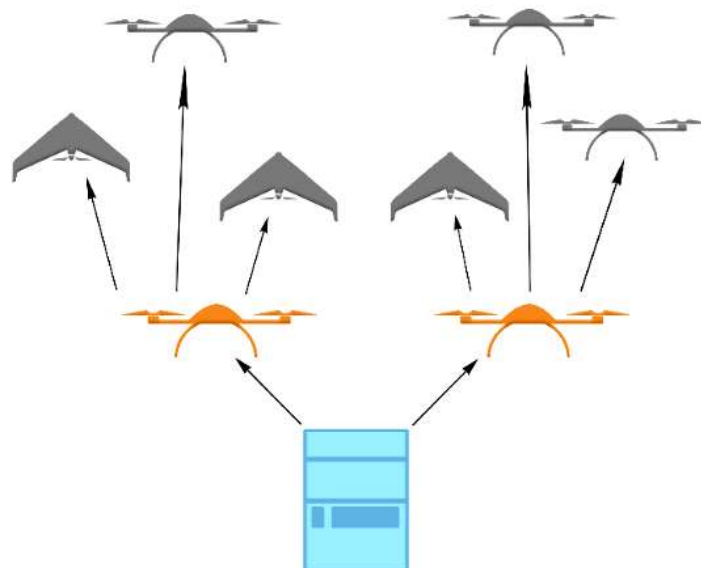


Рисунок 3.14 – Топологія «ієрархічна зірка»

Центральним елементом ієрархії є наземний оператор або головний дрон, котрі зв'язані із підключеними до них роями. На чолі кожного рою стоїть лідер

(«сервер»), що приймає сигнали від підлеглих («клієнтів»). Кожний рій є автономною одиницею збору інформації, котра централізовано буферується лідером і відправляється для подальшої обробки і зберігання на наземні оператори або на головний дрон зграї;

– *Мережево-центрична* (рис. 3.15).

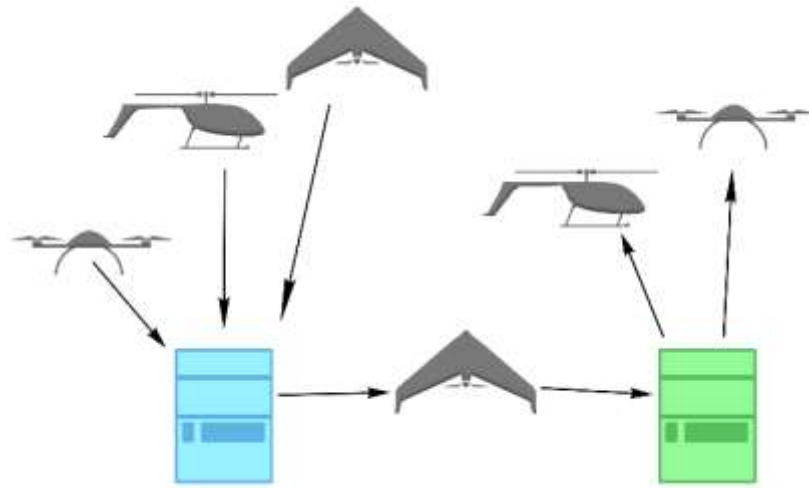


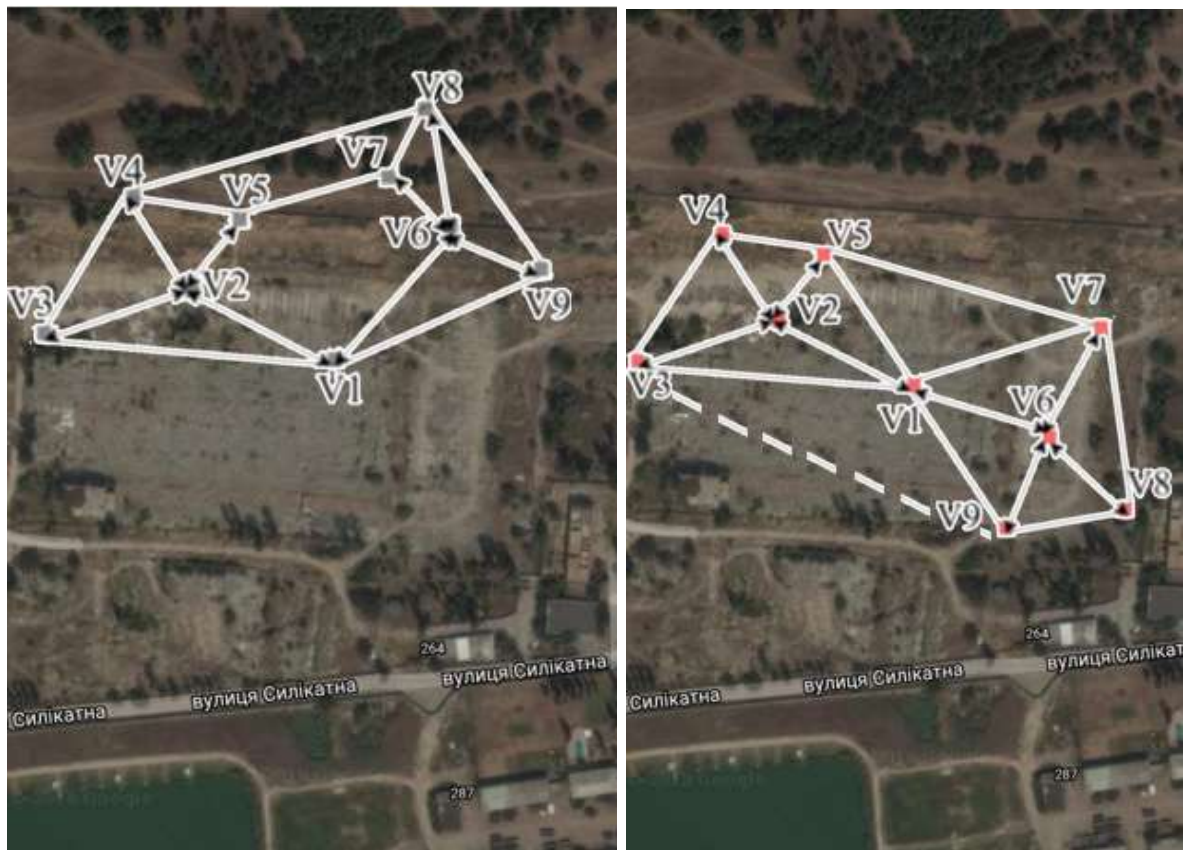
Рисунок 3.15 – Топологія «мережево-центрична»

Сутність мережево-центричної топології РММ полягає в тому, що дрони-клієнти, котрі збирають інформацію, передають дані на найближчі сервери – як наземні оператори, так і дрони. Обмін інформацією між серверами здійснюється за допомогою трансферних дронів – таких, що ретранслюють до іншого вузлу бездротової мережі інформацію, яка надійшла від сусіднього вузла.

Кожна топологія РММ може бути представлена у вигляді навантаженого графа. Вага ребер цих графів буде визначатися як максимальна відстань, на котрій може здійснюватися зв'язок між його вузлами.

3.2.2 Визначення площі кластера мережі з одним головним БПЛА за різними топологіями РММ

Крім математичної моделі динамічної структури, необхідно також контролювати площу доступну та площу, вже оброблену БПЛА у різні проміжки часу (рис. 3.16).



а)

б)

Рисунок 3.16 – Охоплення площі відповідно до графа змішаної топології РММ:

а – «ієрархічна зірка» та «кільце» в i -й момент часу;

б – mesh-топологія в j -й момент часу

У [108, 225] запропонований метод визначення зазначеної площі з використанням теорії графів. Недоліком такого методу є необхідність у кожен момент часу складати та обробляти матриці навантаженості графа, що витрачає обсяг пам'яті на борту БПЛА, який є обмеженим, а також додатково навантажує обчислювач БПЛА розрахунком відстаней між кожною парою вузлів у кластері, утвореному суб-роєм БПЛА.

Слід зазначити, що в різні моменти часу комп'ютерна мережа з БПЛА буде мати різні топології РММ на основі p -го кластера з головним БПЛА-Г у вузлі V1 (рис. 3.16). Але в будь-який момент часу вважається, що зовнішній периметр кожного p -го кластера (суб-рою) такої мережі утворює опуклий багатокутник. Його опуклість забезпечується у такому випадку, коли усі координати широти (або довготи) підлеглих БПЛА-П є більшими (або меншими) за відповідну

координату БПЛА-Г (наприклад, вузол V_1), як наведено на рис. 3.16, а та у табл. 3.1.

Враховуючи умови встановлення радіозв'язку, кожного разу зовнішній периметр такої мережі буде утворювати опуклий багатокутник, тому що у випадку його неопуклості (рис. 3.16, б) між зовнішніми вузлами є пряма електромагнітна видимість, й такі вузли (наприклад, $V_3 - V_9$) можуть напряму обмінюватись інформацією через радіозв'язок без трансферних вузлів, якщо відстань не перевищує максимально можливу.

Таблиця 3.1 – Координати БПЛА на визначеній місцевості

V_i	Координати в i -й момент часу:		Координати в j -й момент часу:	
	широта	довгота	широта	довгота
1	47,009337	31,904993	47,009176	31,904653
2	47,009758	31,903245	47,009598	31,903982
3	47,009487	31,902429	47,009064	31,902880
4	47,010352	31,902580	47,009916	31,903481
5	47,010095	31,903610	47,009796	31,904332
6	47,009905	31,905783	47,008879	31,905836
7	47,010300	31,905340	47,009460	31,906530
8	47,010615	31,906016	47,008441	31,906638
9	47,009743	31,906729	47,008354	31,905549

Площу, яка охоплена зграєю БПЛА на поверхні рис. 3.16, а, можливо обчислити як площу багатокутника – замкнену ламану без самоперетинів (рис. 3.17).

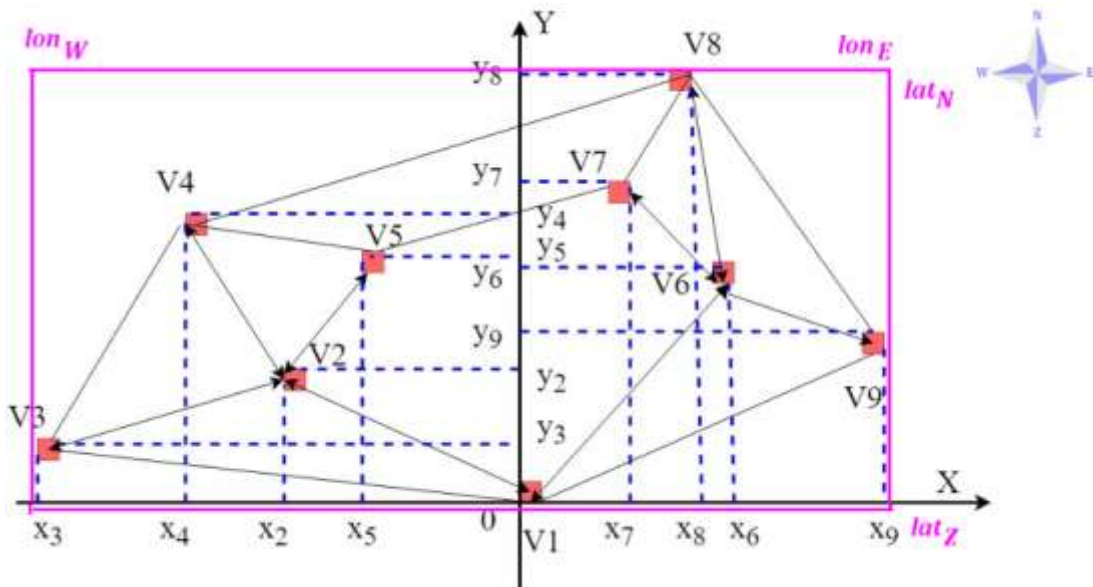


Рисунок 3.17 – Багатокутник з вершин змішаної топології РММ («ієрархічна зірка» й «кільце») та прямокутник Браhmaгупти (зовнішній, ліловий)

Якщо брати до уваги лише координати прямокутника, утвореного найвіддаленішими вузлами топології РММ, його можна вважати геометрично завжди опуклим, навколо якого можливо описати коло. Тоді за класичною формулою Браhmaгупти [25] можна підрахувати площу $S_{B.зміш.}$, охоплювану РММ на основі зграї БПЛА. Наприклад, вважаючи, що зовнішні (крайні) БПЛА зграї орієнтовані за сторонами світу N (північ), Z (південь), W (захід) та E (схід), формула Браhmaгупти для такого прямокутника набуває вигляду:

$$S_{B.зміш.} = \sqrt{(SP_{зміш.} - (lat_N - lat_Z))^2 (111,2 \cdot 10^3)^2 * (SP_{зміш.} - (lon_W - lon_E))^2 (111,2 \cdot 10^3 \cdot \cos(\lfloor lat_N \rfloor))^2}, \quad (3.5)$$

$$S_{B.зміш.} = (111,2 \cdot 10^3)^2 \sqrt{(SP_{зміш.} - (lat_N - lat_Z))^2 * (SP_{зміш.} - (lon_W - lon_E))^2 \cos^2(\lfloor lat_N \rfloor)},$$

де $SP_{зміш.}$ – напівпериметр прямокутника Браhmaгупти (див. рис. 3.17). За будь-якою топологією РММ на основі p -го кластера БПЛА напівпериметр дорівнює:

$$SP_p = 111,210^3 ((lat_N - lat_Z) + (lon_W - lon_E)); \quad (3.6)$$

111,21 – довжина дуги 1° меридіана та 1° паралелі на екваторі (вважається однаковою згідно з основами авіаційної картографії), км;

lat_N та lat_Z – відповідно координати широти самого північного та самого південного вузла p -го кластера БПЛА;

lon_W та lon_E – відповідно координати довготи крайніх БПЛА у кластері на заході та на сході;

$[lat_N]$ – ціла частина координати широти з округленням за Айверсоном [91].

З врахуванням (3.6) вираз (3.5) можна переписати у вигляді:

$$S_{B.p.} = (111,2 \cdot 10^3)^2 \cdot \sqrt{(\lon_W - \lon_E)^2 * (\lat_N - \lat_Z)^2 \cos^2([lat_N])},$$

$$S_{B.p.} = (111,2 \cdot 10^3)^2 \cdot (\lon_W - \lon_E)(\lat_N - \lat_Z) \cdot \cos[lat_N]. \quad (3.7)$$

Для рис. 3.17 розглянутий прямокутник утворюється вузлами $V1-V3-V8-V9$, і формула Брамагупти (3.7) виглядатиме як:

$$S_{B.p.зміш.} = (111,2 \cdot 10^3)^2 (\lon_{V9i} - \lon_{V3i})(\lat_{V8i} - \lat_{V1i}) \cdot \cos([lat_{V8i}]). \quad (3.8)$$

Користуючись чисельними даними щодо координат БПЛА в i -й момент часу, площа покриття p -м кластером БПЛА дорівнює:

$$S_{B.p.зміш.} = (111,2 \cdot 10^3)^2 (31,906729 - 31,902429)(47,010615 -$$

$$-47,009337) \cdot \cos(47^\circ).$$

$$S_{B.p.зміш.} \approx 111,2 \cdot 111,2 \cdot 4,3 \cdot 1,278 \cdot 0,682 = 46208 \text{ (кв. м)}.$$

Але, можна стверджувати, що похибка обчислень площі зграї БПЛА з використанням формула Брамагупти буде зависокою, оскільки управління БПЛА здійснюється таким чином, щоб обмін даними між БПЛА був надійнішим, тому зграя виглядатиме більш скупченою, ніж прямокутник Брамагупти. Тоді чотирикутник, утворений крайніми зі сторін світу вузлами топології РММ, не буде циклічним (вписаним у коло), і його площу необхідно розраховувати з урахуванням теореми Бретшнайдера

Доцільно розробити інший метод, якій враховує більш щільне розташування БПЛА у кластері, при якому мережеві зв'язки за поточною топологією РММ будуть як найкраще забезпечені апаратними можливостями модулів БПЛА.

Порядок обходу вершин P для обчислення площі утвореного p -го кластера навколо БПЛА-Г, зображеного вузлом $V1$ (рис. 3.16, а), виглядає для багатокутника на рис. 3.17, як:

$$P = \{V_1, V_3, V_4, V_8, V_9, V_1\}. \quad (3.9)$$

Уточнена площа $S_{\text{ут.зміш.}}$, яку охоплює згряя БПЛА складається з площ двох типів:

– площ суміжних прямокутних трикутників, до вершин кожного з котрих належить пара вершин опуклого багатокутника зовнішнього периметру p -го кластера;

– площ прямокутників, вершинами яких попарно є сусідні вершини згідно з порядком обходу (3.9) вершин P , які не належать до 2 зовнішніх вузлів багатокутника за порядком обходу P (рис. 3.18):

$$\begin{aligned} S_{\text{ут.зміш.}} = & \left| \frac{y_1 - y_3}{2} (x_1 - x_3) \right| + \left| \frac{y_3 - y_4}{2} (x_3 - x_4) \right| + \\ & + \left| \frac{y_4 - y_8}{2} (x_4 - x_8) \right| + \left| \frac{y_8 - y_9}{2} (x_8 - x_9) \right| + \left| \frac{y_9 - y_1}{2} (x_9 - x_1) \right| + \\ & + |(y_3 - y_4)(x_1 - x_4)| + |(y_4 - y_9)(x_1 - x_8)|. \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} S = & \left| \frac{y_0 + y_3}{2} * (x_0 - x_3) \right| + \left| \frac{y_3 + y_4}{2} * (x_3 - x_4) \right| + \left| \frac{y_4 + y_5}{2} * (x_4 - x_5) \right| + \dots + \\ & + \left| \frac{y_8 + y_9}{2} * (x_8 - x_9) \right| + \left| \frac{y_9 + y_0}{2} * (x_9 - x_0) \right|. \end{aligned}$$

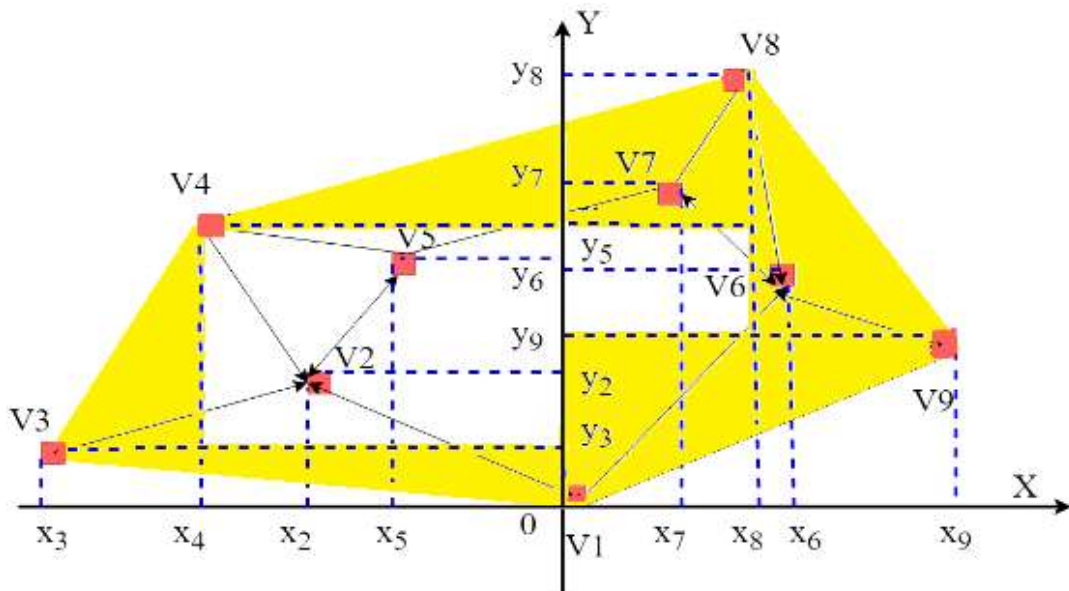


Рисунок 3.18 – Обрахування площі кластера з БПЛА зі змішаною топологією РММ

Результати розрахунків площі функціонування суб-рою БПЛА на рис. 3.16, а, виконані за розробленим уточнюючим методом визначення площі функціонування БПЛА, наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Площі згідно з координатами БПЛА

Площа в i -й момент часу, m^2		Необстежена площа, %	Площа в j -й момент часу, m^2		Необстежена площа, %
за формулою Браhmaгупти	за уточненим методом		за формулою Браhmaгупти	за уточненим методом	
46208	40162	15,1	49503	37109	33,4

Наведені площі розраховані для топології РММ на основі p -го кластера навколо головного БПЛА-Г, зображеного вузлом $V1$ на рис. 3.16, б, зовнішніми вузлами є $V4$ та $V9$ за широтою і $V3$ та $V8$ за довготою.

Тоді за формулою Браhmaгупти площа в j -й момент часу згідно з (5.14) дорівнює:

$$S_{B.p.mesh} = (111,210^3)^2 (\text{lon}_{V8j} - \text{lon}_{V3j}) (\text{lat}_{V4j} - \text{lat}_{V9j}) \cdot \cos[\text{lat}_{V4j}],$$

$$S_{B.p.mesh} = (111,2 \cdot 10^3)^2 \cdot (31,906638 - 31,902880)(47,009916 - 47,008354) \cdot \cos(47^\circ).$$

$$S_{B.p.mesh} = 111,2 \cdot 111,2 \cdot 3,758 \cdot 1,562 \cdot 0,682 = 49503 \text{ (кв. м)}.$$

Відповідно до запропонованого уточнюючого методу, вирази (3.9)–(3.10) та рис. 3.19 перетворяться на наступні з врахуванням того, що вузол V1 стає внутрішнім, тому початковим вузлом обходу P стає вузол, наступний за V1:

$$P = \{V_3, V_4, V_5, V_7, V_8, V_9, V_3\}. \quad (3.11)$$

$$S = \left| \frac{y_4 - y_3}{2} (x_4 - x_3) \right| + \left| \frac{y_5 - y_4}{2} (x_5 - x_4) \right| + \left| \frac{y_7 - y_5}{2} (x_7 - x_5) \right| + \left| \frac{y_8 - y_7}{2} (x_8 - x_7) \right| + \left| \frac{y_9 - y_8}{2} (x_9 - x_8) \right| + \left| \frac{y_9 - y_3}{2} (x_9 - x_3) \right| + |(y_5 - y_3)(x_4 - x_5)| + |(y_3 - y_7)(x_7 - x_5)| + |(y_8 - y_3)(x_9 - x_7)|. \quad (3.12)$$

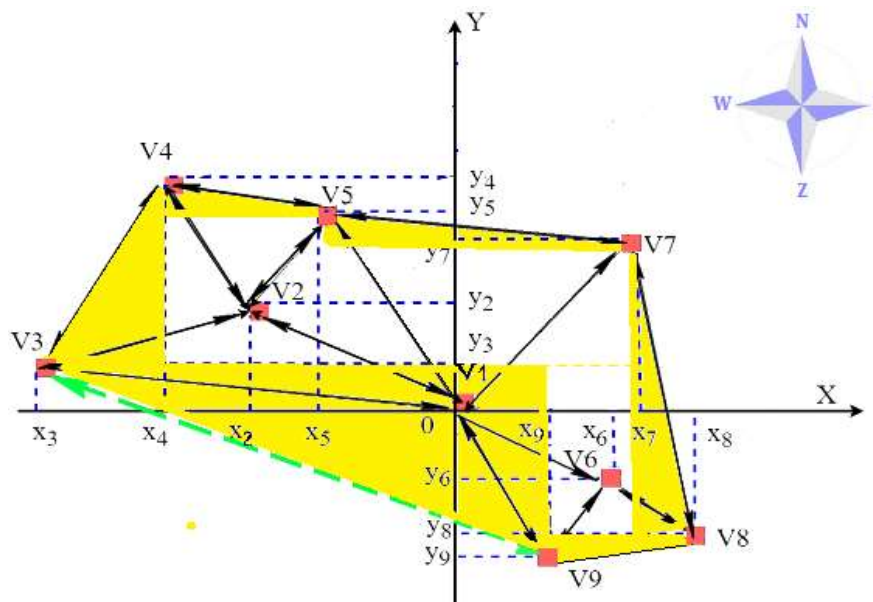


Рисунок 3.19 – Обрахування площі кластера БПЛА за mesh-топологією РММ

Для узагальнення обчислення площі S_p , охопленої p -м кластером БПЛА, можна вивести формулу (3.13), яка використовується для обчислення площ багатокутників, заданих вершинами з наведеним порядком обходу P :

$$S_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n+1} |(x_i - x_{i+1})(y_i - y_{i+1})| + \sum_{k=i+1}^{n-1} |(x_k - x_{k+1})(y_k - y_{k+1})|; \quad (3.13)$$

$$S = \frac{1}{2} |\sum_{i=0}^n (x_i - x_{i+1})(y_i + y_{i+1})|, x_0 = x_{n+1}, y_0 = y_{n+1}.$$

До даної формули можна застосувати інтерполяцію для знаходження проміжних значень величин по дискретному набору відомих значень. Нехай ϵ система неспівпадаючих точок x_i для $i \in 1, \dots, N$ з області координатних значень та значення функцій в цих точках $y_i = f(x_i), i = 1, \dots, N$. Процес інтерполяції буде полягати в знаходженні з цих значень такої функції $F(x_i, y_i), i = 1, \dots, N$, яка б відповідала значенню суми площ трапецій, побудованих на точках (x_i, y_i) .

Таким чином, узагальнюючи вищенаведене, можна запропонувати метод визначення площі функціонування зграї БПЛА, побудованої окремо за кожною з розглянутих топологій РММ.

У наведеному дослідженні до опису поведінки зграї БПЛА застосовується метод моделювання структури складних технічних систем. Запропонований підхід дозволяє більш ретельно планувати виконання завдання на заданій території з визначенням необхідної кількості БПЛА у зграї.

Координати широти та довготи на БПЛА надають GPS-модулі, а висоту над рівнем поверхні – альтиметр (якщо висота більше 3 м; нижче необхідно використовувати дані з ультразвукового висотоміра-сонара). На основі вимірювань тиску барометром та їх порівняння з еталонними значеннями можна розрахувати висоту над рівнем моря. Для аерозйомки або для обприскування добривами непотрібні тривимірні координати. Для знаходження проекції на поверхню достатньо координат GPS-модулів. Округлення координат до цілого числа секунд дає точність порядку $111 \text{ км} / 3600 \approx 30 \text{ м}$, що теж зменшує обчислювальну складність.

За дотриманням наведених умов можливо планувати переміщення зграї БПЛА з урахуванням площі, розрахованої для кожної архітектури рухомої мережі, побудованої за різними топологіями. Такий підхід, покладений в основу запропонованого методу визначення площі, охопленої зграєю БПЛА, дозволить не відключати, наприклад, модулі зв'язку, як це зазвичай передбачено керуючими системами БПЛА задля економії заряду батареї та подовження часу функціонування строю.

Запропонований підхід здатен підвищити ефективність використання гетерогенної мережі на базі БПА будь-яких конструкцій, сприяти розвитку технологій моніторингу різноманітних показників, дистанційного зондування природних ресурсів, фотограмметрії тощо.

3.3 Моделювання групової поведінки об'єктів РММ

3.3.1 Методи моделювання поведінки БПЛА у зграї

При моделюванні функціонування РММ доцільно вивчати поведінку не окремих об'єктів, а поведінку одно-/різнотипних БПЛА у складі суб-рою, а суб-роїв – у складі зграї. Прийнято розподіляти дрони між суб-роями або за територіальною ознакою, або за технічним призначенням таких дронів.

При формування суб-роїв за територіальною ознакою суб-рій виконує завдання на спільній території. Зграя з таких суб-роїв обслуговує певну територію, поділену на сектори, власні для кожного суб-рою.

По-перше, задачею моделювання є попередження критичних ситуацій при зіткненні дронів суб-рою один з одним.

По друге, доцільно змоделювати послідовне переміщення БПЛА за маршрутом, що математично приводиться до методів вирішення задачі комівояжера. Враховуючи обмежені можливості дрона знаходитись у польоті (обмежену ємність батареї), необхідно на кожному з маршрутів визначати довжину та час шляху кожного дрона.

При спільній роботі дронів у суб-рою кожен з них повинен знати відсоток виконання спільного завдання, тобто ту частину роботи, яка вже виконана іншими дронами. Як описано у попередніх розділах, для самонавчання такої мережі можливо використання НМХ. Але в такому разі необхідно визначати та враховувати при реалізації задачі комівояжера достатньо велику похибку у розрахунках суб-оптимального шляху [136, 394].

Такий підхід особливо ефективний, коли кожен БПЛА достатньо примітивний та не виділяється серед інших. В такому випадку індивідуальні траєкторії й характеристики окремих об'єктів стають несуттєвими. На перший

план виходять колективні типи рухів, що забезпечують безаварійне переміщення дронів, та колективні параметри, що визначають відсоток виконання всього завдання зграєю або кожним суб-роєм окремо.

При 2D-модельованні поведінки зграї БПЛА на великій території (згідно з мапою місцевості) вся територія може бути розбита на сегменти, у кожному з яких працює окремий суб-рій зграї (рис. 3.20). Вважається, що дрони з різних суб-роїв не перетинають межу власного сегменту території.

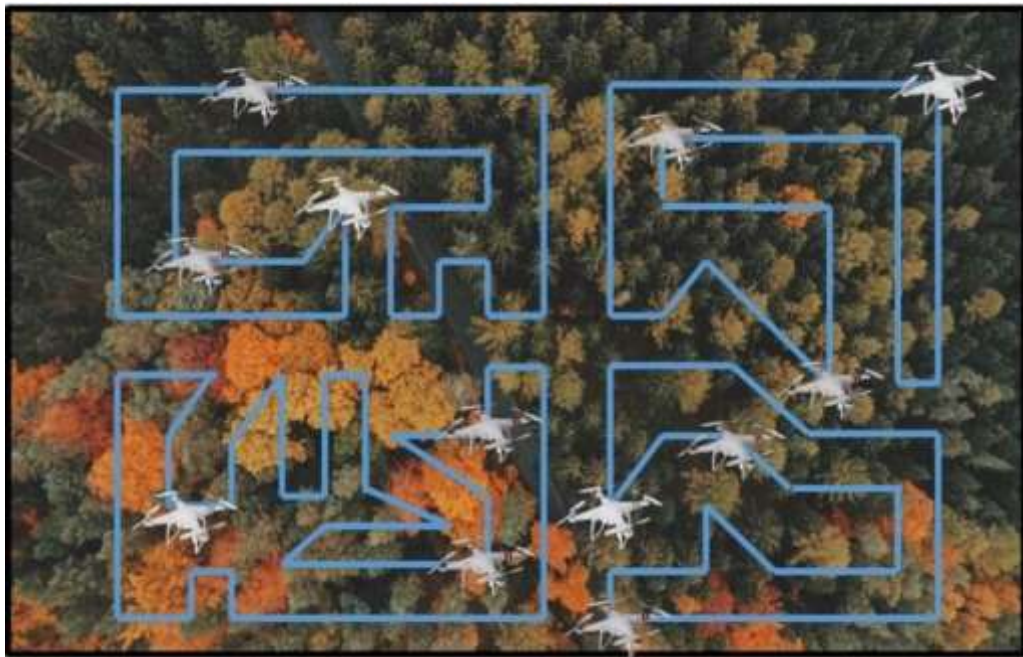


Рисунок 3.20 – Розбиття території на чотири сектори для кожного суб-рою з трьох БПЛА

В такому разі наземний оператор задає точки, які має відвідати безпілотник в межах свого сегменту. Оператор це зможе зробити, задавши безпосередньо координати точок або відмітивши їх на мапі місцевості.

Кожну точку дрон має відвідати один раз. Кожну точку може відвідати або лише один дрон, або кожен дрон суб-рою.

Перевагою використаного методу є, коли дрони суб-рою у кожний момент часу знають про місцезнаходження одне одного.

Нехай задано місцевість для обстеження її з допомогою БПЛА. На мапу місцевості наноситься координатна сітка і задається точка відліку (рис. 3.21).



Рисунок 3.21 – Карта місцевості з нанесеною системою координат

Якщо оператор хоче, щоб БПЛА зробив знімки/вимірювання у трьох вузлах місцевості $(0;0)$, $(0,3;1)$, $(1;0,5)$, достатньо одного БПЛА (рис. 3.12). Тоді існує лише один маршрут, який, відповідно, є й найкоротшим. Проте, якщо додати ще один вузол – наприклад, $(1;1,5)$ – то маршрутів становиться значно більше, а точніше $e \frac{(n-1)!}{2}$ маршрутів, де n – кількість вузлів у маршруті.

Якщо площа обстежуваної території й кількість обстежуваних вузлів зростатиме, на перший план виходить обмежений час польоту БПЛА. Такі обмеження накладає не тільки ємність батареї БПЛА, а також метеоумови (швидкість вітру, температура середовища тощо). В такому разі кількість обстежуваних сегментів території визначає кількість використовуваних суб-роїв у зграї. Кількість БПЛА у суб-рою визначається площею сегменту,

Як показано у попередніх розділах, у всіх БПЛА одного суб-рою точка старту може бути спільною. Інакше для кожного БПЛА визначається власна точка старту (рис. 3.22), до якої він повертається або після виконання завдання, або на підзарядку акумуляторної батареї.



Рисунок 3.22 – Карта місцевості з нанесеними точками старту трьох БПЛА одного суб-рою

Отже, описане завдання є не чим іншим, як вирішенням задачі комівояжера [321, 323, 334]. Задача комівояжера – одне з найвідоміших завдань комбінаторної оптимізації, що полягає у пошуку найвигіднішого маршруту, що проходить через вказані точки хоч би по одному разу з подальшим поверненням в початкову точку. В умовах завдання вказуються критерій вигідності маршруту (найкоротший, найдешевший, сукупний критерій і тому подібне) і відповідні матриці відстаней, вартості і т. п. Як вже зазначалось, вважатимемо найкращим маршрут найкоротший, а кожен вузол має бути відвіданим лише один раз.

Нейронна мережа Хопфілда може використовуватися для вирішення завдання комівояжера. Для цього НМХ має відповідати деяким вимогам:

Мережа повинна складатися з $N = n \times n$ нейронів, які розглядається як квадрат з n рядків і n стовпців [394].

1. Відповідь мережі повинна містити лише один активний нейрон в кожному рядку і кожному стовпці.

2. Активний нейрон в першому стовпці задає першу точку маршруту, в другому стовпці – друга точка маршруту, і так далі.

Усім цим умовам задовольняє формула (3.14) обчислення ваги між нейроном, що відповідає точці x на позиції в i -му маршруті, і нейроном, що відповідає точці y на позиції j [136].

$$W_{xi,yi} = -A\delta_{x,y} \cdot (1 - \delta_{i,j}) - B\delta_{i,j} \cdot (1 - \delta_{x,y}) - Cd(x,y) \times \quad (3.14) \\ \times (\delta_{i,j+1} + \delta_{i,j-1}) + D,$$

де A, B, C, D – деякі константи;

$d(x, y)$ – відстань між точками x і y ;

$\delta_{x,y}$ – символ Кронекера, що набуває значення «1», якщо $x = y$ і значення «0» в інших випадках.

Як легко бачити, перший член рівний ($-A$) для усіх зв'язків в тому ж рядку ($x = y$), окрім зв'язку нейрона з самим собою (при $i = j$). Другий член рівний мінус B для усіх зв'язків в тому ж стовпці ($i = j$), окрім зв'язку з самим собою ($x = y$). Третій член пропорційний відстані між точками x і y , якщо ці міста сусідні в маршруті ($i = j - 1$ чи $i = j + 1$).

Якщо таку мережу привести у випадковий початковий стан, то можна очікувати, що результуючий стабільний стан дасть нам суб-оптимальний шлях, довжина якого не занадто перевершує оптимальну (сам шлях може значно відрізнятись від оптимального). Відповідно, для практичного застосування мережу слід запустити декілька разів. За результатами розрахунків можна вибрати найкращий шлях [315].

Але завдання може ставитись й інакше. Наприклад, для розрахунку середнього значення необхідно зробити декілька однакових вимірювань у заданих точках. Таке завдання доцільно виконувати за допомогою суб-рою БПЛА, для яких згенеровані різні маршрути через точки з такими ж координатами місцевості. Тоді кожен БПЛА у суб-рою рухається за власним згенерованим маршрутом.

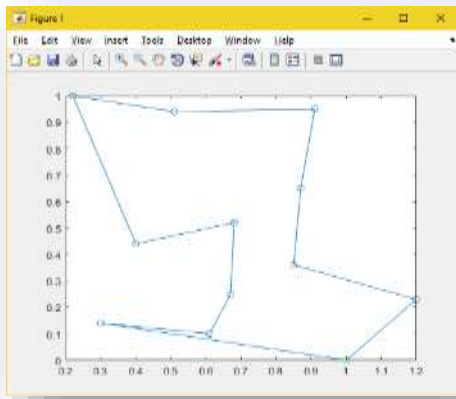
Для вирішення описаної задачі було створено програмний застосунок DRAG’N’DRONE, який генерує маршрути на основі введених оператором точок для обстеження. Порівняння функціоналу зазначеного застосунку з промисловими аналогами наведено у табл. 3.3.

Наприклад, кожен БПЛА має облетіти територію, відвідавши 11 вузлів (рис. 3.12): (1;0), (0,4;0,44), (0,3;0,14), (1,2;0,23), (0,22;1), (0,51;0,93), (0,87;0,65), (0,68;0,55), (0,85;0,35), (0,67;0,25); (0,61;0,1), (0,61;0,1), (0,91;0,95).

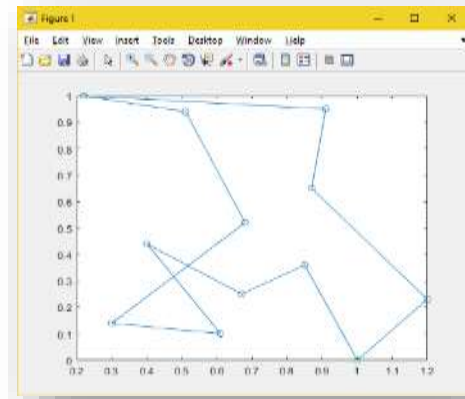
Таблиця 3.3 – Порівняння функціоналу застосунку DRAG’N’DRONE з промисловими аналогами

	Using Google services	Controlling of multiple drones at the same time	Directly selection of points on the map	Interconnection of drones during flight
DRAG’N’DRONE	✓	✓	✓	✓
PixiePath	✓	✓	✗	✗
ArduPilot (APM)	✗	✓	✓	✗
Alphabet (UTM platform)	✓	✓	✓	✓

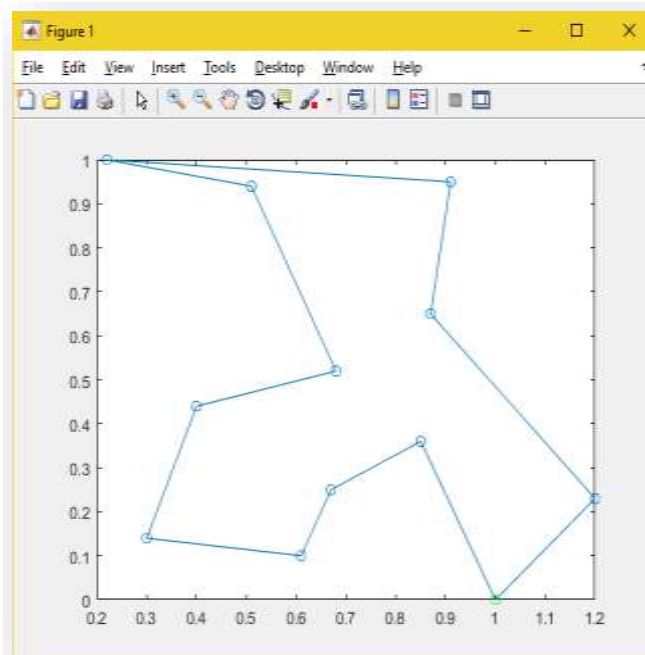
Програма має бути запущеною стільки разів, скільки унікальних маршрутів необхідно згенерувати відповідно до кількості БПЛА у суб-рою. Результат генерації програмою (в результаті її послідовних викликів на основі одних й тих самих даних) суб-оптимальних маршрутів для кожного з трьох БПЛА у складі суб-рою наведений на рис. 3.23, а – рис. 3.23, в.



а)



б)



в)

Рисунок 3.23 – Програмно згенеровані суб-оптимальні маршрути для кожного з трьох (а, б, в) БПЛА суб-рою

При моделюванні вважається, що:

- оптимальним маршрутом є найкоротший;
- облетівши всі вузли сегменту території, кожен з БПЛА суб-рою має повернутись у власну точку вильоту;
- БПЛА має відвідати кожен вузол лише один раз.

Для попередження подвійного відвідання одного вузлу було обрано НМХ.

Таблиця 3.4 – Аналіз згенерованих НМХ маршрутів для трьох БПЛА

№ маршруту	Довжина маршруту, Len (км)	Відхилення довжини маршруту	
		абсолютне, $ \Delta D $ (км)	відносне, $\varepsilon = \frac{\Delta D}{D}$ (%)
1	4,3536	0,0092	2,96
2	4,5278	0,1834	
3	4,1519	0,1925	

З табл. 3.4 видно, що маршрути, згенеровані в результаті виконання програми, мають приблизно однакову довжину, проте вигляд мають абсолютно різний. Як вже зазначалось, річ у тім, що НМХ може вирішити задачу комівояжера лише приблизно (результат зазвичай трохи довший за ідеальне значення). Тому маршрути, що генеруються з використанням НМХ, завжди приблизно однакові по довжині, але різні за порядком проходження вузлів.

Вважаючи, що НМХ є доволі приблизним методом вирішення проблеми, вона використана для генерування маршрутів за кількістю БПЛА у суб-рою. Суб-оптимальні шляхи отримані в результаті декількох послідовних запусків (за кількістю БПЛА у суб-рою) програми з тими самими вхідними даними. Такі маршрути досить схожі на оптимальний маршрут за довжиною (незначно його перевищують), але які суттєво відрізняються від нього. В результаті такі маршрути можуть використовуватися по одному для кожного БПЛА у суб-рою.

Передбачається автономна або напівкерована поведінка БПЛА. Тобто, шлях може бути або згенерованим автоматично, або обраним оператором, включно з обранням послідовності опрацьованих точок місцевості.

Ризики, з якими можна зіткнутись:

- декілька БПЛА можуть опинитись в одній точці одночасно;
- висота руху БПЛА може бути занадто малою для маневрування, й т. п.

Використання двовимірної мапи території для переміщення зграї БПЛА у

просторі дозволяє за допомогою системи навігації БПЛА відпрацьовувати маршрут БПЛА, що веде до мети. Певну увагу при цьому необхідно приділити обминанню перешкод, що зустрічаються на шляху БПЛА, а також попередити зіткнення БПЛА один з одним.

Задля приближення результатів моделювання до реального переміщення БПЛА необхідно враховувати, що він змінює не тільки власні GPS-координати, а й висоту. Зазначені зміни виконуються та відстежуються навігаційною системою, що використовує GPS/ГЛОНАСС, доповненої засобами системи орієнтації: технічного зору, далекоміром, інфрачервоними датчиками і т. д.

До того ж, сучасні БПЛА здатні не тільки виконувати команди, що надходять з КЦ, які регламентують параметри руху (азимут, швидкість, прискорення), але й самостійно планувати траєкторію з огляду на необхідність також вирішувати завдання обминання перешкод та запобігання зіткненням.

Сукупність цих засобів забезпечує рухомий об'єкт (БПЛА) досить об'єктивною інформацією про поточне місцезнаходження. Досягнення цільового положення здійснюється за деякою траєкторією, для попереднього планування якої необхідна інформація про зовнішнє середовище – простір, в якому буде проводитися рух.

Відмінною особливістю стратегічного планування є використання менш детальної мапи місцевості ніж при тактичному плануванні. На цьому етапі в якості перешкод можуть розглядатися досить великі об'єкти, наприклад, будівля, болото, крутий гірський схил і т. д. В таких умовах розміри стратегічної мапи місцевості можуть стати прийнятними для здійснення планування траєкторії безпосередньо бортовим обчислювачем, обчислювальні можливості якого, зрозуміло, не надто великі.

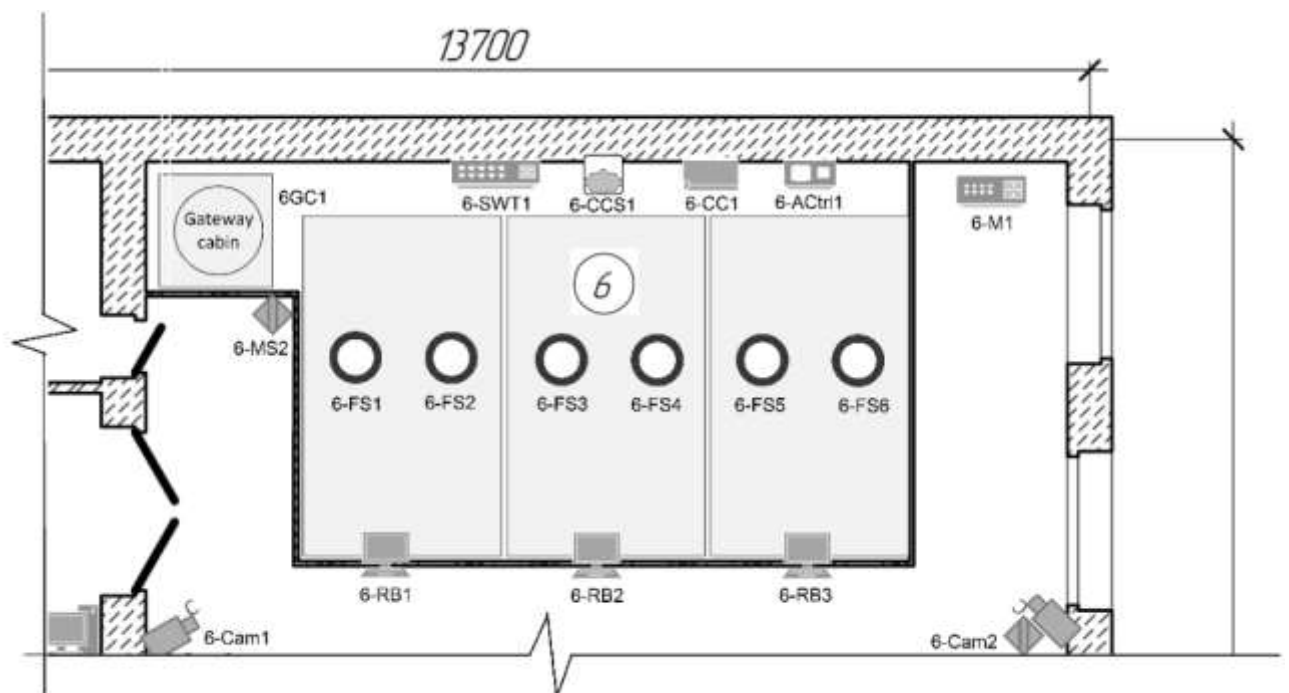
Тому перехід до тактичного планування, з опрацюванням більш детальних мап місцевості, виконується лише у разі настання загрози критичного застосування БПЛА. Тоді використовується більш детальна мапа території, яка може бути отримана з різних джерел. На етапі детального планування побудована траєкторія доповнюється і згладжується, враховуючи особливості реалізації

транспортного механізму БПЛА, до яких відносяться, наприклад, найменший радіус повороту, мінімальні і максимальні значення прискорення і швидкості руху, максимально допустима крутизна траєкторії руху й т. і.

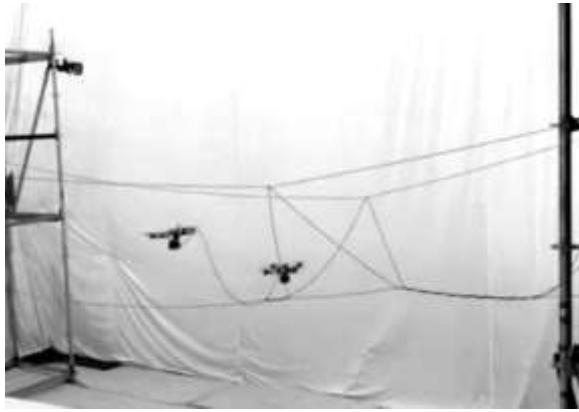
3.3.2 Моделювання поведінки суб-роїв БПА у просторових коридорах

При розроблюванні методів створення та функціонування РМ, яка складається з суб-роїв по 2 БПА (робота, дрона тощо) в кожному слід враховувати, що кожен суб-рій функціонує у власному просторовому коридорі.

На рис. 3.24, а наведений план території для моделювання поведінки спарених БПА на складі (товарному, фармацевтичному, поштовому та ін.). На рис. 3.24, б завдання суб-рою з двох БПЛА – це побудування мотузкового моста на подібну підвісного моста Каррік-а-Ред (Північна Ірландія), який має довжину 20 метрів і на 30 метрів височить над скелями. Для зазначених об'єктів використання БПЛА є більш доцільнішим ніж в інший спосіб.



a)



б)



в)

Рисунок 3.24 – Суб-рої БПА, що складаються з 2 БПЛА (FSi) кожен, розташовані в 3 наземних складських коридорах (а) та в одному коридорі повітряного простору (б) [7] для побудови мотузкового моста (в) [37]

ШГКМ базуються на роях (суб-роях) та зграях таких БПА, як безпілотні наземні апарати (англ. UGV), безпілотні підводні апарати (англ. UUV), безпілотні надводні (поверхневі) апарати (англ. USV) або безпілотні літальні апарати (БПЛА або «дрони»; англ. UAV).

Технологічні завдання використання рою БПА будь-якого виду передбачають алгоритмізацію переміщення БПА всередині обмеженого простору. Досить великим є клас задач, що передбачає потрапляння одного з БПА в зумовлену точку з чітко означеними координатами. Причому, кожна точка повинна бути переглянута хоча б одним з БПА.

Математично така задача зводиться до класичної задачі комівояжера [73, 321]. Але актуальними також є завдання, у яких поведінка робота-«комівояжера» описується не тільки в географічних координатах (2D-завдання), але також враховується, на якій висоті переміщується такий БПА. При такому підході повинна вирішуватися 3D-завдання комівояжера [81].

Крім того, весь використовуваний рій БПА часто розбивається на групи (так звані суб-рої), кожна з яких виконує своє завдання. Хоча такі завдання і є аналогічними тим, що виконуються іншою групою, але кожна з таких груп діє в своєму просторовому коридорі.

Проблема полягає в тому, що існуючі алгоритми вирішення так званої

«задачі комівояжера» (англ. Traveling Salesman Problem або TSP) на пошук оптимального маршруту витрачають значну кількість обчислювальних і часових ресурсів – до 10 с для 20 точок маршруту [358]. Але у швидкодинамічних системах, пов'язаних зі швидкістю переміщення БПЛА від 5 м/с до 20 м/с [16], просторовий коридор може бути пройдений швидше, ніж буде розрахований оптимальний маршрут. Крім того, на відміну від класичної задачі комівояжера, кожен вузол мережі має бути відвіданим задану кількість разів.

Тому необхідно розглянути можливість приведення 3D-завдання TSP до більш простої і швидко розв'язуваної двовимірної задачі, або до розбиття 3D-завдання на декілька двовимірних, що паралельно вирішуються на різних обчислювальних ресурсах, з подальшою конкатенацією знайдених рішень.

Крім того, в класичних рішеннях 3D-завдання salesman-«комівояжер» представляється просторовою точкою, яка не має фізичного об'єму [236]. У реальних виробничих умовах такий підхід може призвести або до краху окремих БПА, і навіть їх пар, в результаті зіткнень один з одним, або вимагатиме додаткового обсягу обчислень, пов'язаних зі спробою уникнути перешкоди, за які будуть прийняті інші члени рою.

Все вищевикладене логічно призводить до необхідності попереднього проведення математичного моделювання з метою уникнути критичних ситуацій при використанні рою БПА в обмеженому просторі.

Моделювання групової поведінки групи БПА передбачає розбиття останніх на суб-рої, які виконують аналогічні завдання в обмежених просторових коридорах. В такому разі формування траєкторії здійснюється за принципом «точка–лінія–площина» (рис. 3.25).

Наприклад, при вирішенні завдання відбору необхідних за замовленням товарів на складі, необхідно достатньою мірою оптимізувати рух групи БПА, які працюють спільно в одному з просторових коридорів: 6-FS1 & 6-FS2, 6-FS3 & 6-FS4, 6-FS5 & 6-FS6 (на рис. 3.24, а, у приміщенні № 6).

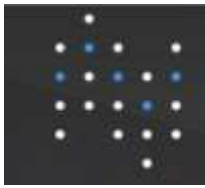


Рисунок 3.25 – Формування траєкторії групи БПЛА за принципом «точка–лінія–площина» [369]

Необхідно відзначити, що така постановка задачі руху БПА у просторовому коридорі не є класичною задачею TSP. Наприклад, для створення міцної конструкції, що витримує людину (рис. 3.24, б), підвісний канатний міст повинен бути побудований з різних елементів, таких як вузли, опорні елементи й т. п. [13]. Для виконання таких елементів UAV-«комівояжер» повинен пройти через деякі вузли маршруту по декілька разів. До того ж, у процесі такого «будівництва» UAV повинен декілька разів повертатися на базу (стартову або іншу певну точку) або для підзарядки акумуляторних батарей, або для поповнення котушки будівельним матеріалом (мотузкою).

Зважаючи на те, що в обох випадках на рис. 3.24 розглядається коридор з боковими стелажми, тому немає необхідності при переміщенні з однієї частини коридору на іншу враховувати точки посеред коридору. Завдяки цьому таку задачу можна вважати не 3D-задачею, а композицією двох 2D-задач TSP: на лівій вертикальній площині та правій вертикальній площині в кожному коридорі окремо.

В такому разі розглядається задача забезпечення узгодженого руху БПА лише у межах кожного суб-рою окремо задля виконання спільного завдання в кожному коридорі (підбору товарів або ін.). Тоді у випадку, якщо єдиний КЦ відсутній, правила руху кожного БПА визначаються його діями та діями його сусідів. Для більш ефективного вирішення завдання узгодженого руху необхідно

виділити процедуру планування, де кожен член рою визначає для себе деякі початкові дії. Такі дії обумовлені його обмеженими можливостями, тому потім відбувається коригування цих дій в залежності від дій інших членів рою.

Алгоритми вирішення TSP ґрунтуються на пошуку на графі найкоротшої відстані від вихідної точки до якоїсь необхідної точки, що відповідає кінцю шляху.

З іншого боку, відомі алгоритми не враховують появу перешкод, які є членами колективу БПА і можуть змінювати своє положення з плином часу. Це призводить до того, що на шляху проходження можуть виникнути непередбачені перешкоди, і час досягнення цілі збільшиться.

Для початку процесу рішення задачі необхідно мати:

- список найменувань товарів/вузлів та їх кількість;
- координати розташування цих товарів/вузлів на площині боків просторового коридору (на полицях стелажів);
- власні координати кожного БПА.

В процесі ці дані мають змінюватися:

- список необхідних товарів/вузлів має скорочуватися;
- власні координати БПА змінюються;
- координати всіх членів рою БПА змінюються.

Необхідно зауважити, що у випадку використання БПА доставки (як на розглянутому складі), необхідно повернення БПА на початкову позицію для укладання товарів по замовленнях або по завершенні списку, або в результаті переповнення рухомого контейнера, або за іншими обмежувальними умовами.

Оскільки обмін інформацією між членами рою обмежений, використання одного з алгоритмів пошуку шляху, таких як алгоритм Дейкстри, хвильовий алгоритм та ін., в процесі руху до цілі буде неефективним [136].

Найбільш відповідним варіантом буде спланувати узгоджені дії членів колективу, а потім слідувати цьому плану. Для цього всім БПА команди необхідно зробити початковий вибір, щоб потім мати можливість оцінити його ефективність у порівнянні з іншим сценарієм. Кожен з БПА визначає найближчу

ціль.

Вибір цілі (товарів, технологічних вузлів тощо) кожним БПА здійснюється за допомогою спеціальної матриці вибору:

$$T = \left\| \left\| t_{ij} \right\| \right\|, (i = 0, 1, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m). \quad (3.15)$$

Наприклад, для фармаскладу матриця вибору являє собою матрицю розміром $n \times m$, де n – загальна кількість БПА, m – кількість найменувань ліків, t_{ij} – відстань, пройдена i -м БПА для досягнення стелажа з j -м лікарським засобом. Кожен i -й БПА знаходить мінімальне значення Tmn_{\min} та вважає його найоптимальнішим. Потім перевіряються відстані всіх БПА, і завдання отримує той БПА, що має найменшу відстань і не має інших завдань; модель переобчислюється, і вибір цілей виконується заново. У разі, якщо цілі не помінялися, обраний план затверджується.

Таким чином досягається можливість оцінити справжній час досягнення БПА відповідного стелажа без урахування всіх можливих перешкод, які можуть виникнути на його шляху.

Для реалізації можливості врахування змін зовнішнього середовища (можливості відслідковувати переміщення інших БПА) необхідно через кожен момент часу t отримувати нові дані, враховувати можливий перетин траєкторій і встановити ієрархію зупинок БПА.

У завданнях управління поворотами БПА, переміщеннями апаратів й т. ін. виникає необхідність розрахунку положення і орієнтації твердих тіл в дискретні моменти часу. Передані команди управління містять код кожного із заздалегідь визначених маневрів, параметри зазначеного маневру, дані про момент початку маневру і його закінчення. Об'єкти здійснюють складний просторовий рух, який розглядається як комбінація поступального й обертального рухів деякої точки або сукупності точок.

Підхід до реалізації алгоритмів повороту пов'язаний з використанням цілочисельної арифметики. Серед алгоритмів, здатних вирішити цю задачу, може

бути вибраним алгоритм Браччіні [30], який активно використовуються зарубіжними дослідниками та інженерами для апаратної реалізації поворотів.

Згідно з алгоритмом Браччіні для генерації точок на прямій лінії, точка з цілими координатами (X, Y) належить прямій лінії, яка виходить з початку координат з коефіцієнтом нахилу $k = (\Delta Y / \Delta X)$, якщо виконується умова:

$$Y - \frac{\Delta Y}{\Delta X} * X \leq \varepsilon, \quad (3.16)$$

де $|\varepsilon| \leq 0,5$.

Використовуючи лише цілочисельні змінні $X, Y, \Delta X, \Delta Y$, можливо сформулювати таку умову приналежності точки прямій лінії:

$$-\Delta X \leq 2 * \Delta Y * X - 2 * \Delta X * Y \leq \Delta X. \quad (3.17)$$

Тоді для зростаючої послідовності значень X , які відрізняються на одиницю, відповідні значення Y можна знайти на основі перевірки виконання наведеного співвідношення.

Стосовно до задачі управління БПА, алгоритм може бути використаний для розрахунку траєкторії руху об'єкта під будь-яким заданим кутом в реальному часі.

Для вирішення задачі плоского повороту на основі алгоритму Браччіні [30] вихідний об'єкт (тверде тіло) представляється в загальному випадку у вигляді матриці елементів – системи фізичних точок, причому в простому випадку маємо єдину точку (X, Y) . Потрібно виконати поворот системи точок на заданий кут.

У запропонованому алгоритмі повороту, заснованому на використанні моделі Браччіні [136], нові координати (X^*, Y^*) точки (X, Y) визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} X^* &= (M/L) * X + (N/L) * Y, \\ Y^* &= -(N/L) * X + (M/L) * Y. \end{aligned} \quad (3.18)$$

При виконанні перетворення повороту в загальному випадку кут повороту α задається трійкою (M, N, L) цілих чисел, причому

$$L^2 = M^2 + N^2, \quad M/L = \cos \alpha, \quad N/L = \sin \alpha. \quad (3.19)$$

Таблиця синусів і косинусів у вигляді частки цілих чисел обчислюється заздалегідь і зберігається в пам'яті системи управління поворотом.

Для послідовності значень координат X і Y , відповідні значення X^* та Y^* можна знайти на основі перевірки виконання співвідношення:

$$\begin{aligned} |2LX^* - 2MX - 2NY| &\leq L, \\ |2LY^* + 2NX - 2MY| &\leq L. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Час виконання алгоритму повороту оцінюється, як $\theta(k)$, де k – число точок об'єкта.

Алгоритм використовує для своєї реалізації лише цілі числа і операції над ними, не спирається на пряме обчислення тригонометричних функцій, що забезпечує доцільність його застосування в системах управління об'єктами в рухомих системах при обмежених обчислювальних ресурсах. Передбачається, що цілочисельні алгоритми ляжуть в основу повнофункціональних засобів управління траєкторних рухом апаратів з обмеженими обчислювальними можливостями для виконання поставлених завдань. Крім того, вбудоване в бортовий обчислювач програмне забезпечення забезпечить визначення кутів орієнтації і параметрів руху; навігацію і управління при русі по заданій траєкторії, вибір кутів та орієнтацію в просторовому коридорі.

Наведена нижче модель даних була розроблена з урахуванням всіх зазначених параметрів. Тут кожна виробнича одиниця має власні параметри розміщення, такі як кількість стелажів, кількість полиць, спеціальний код позиції та ін. Модель даних була побудована в програмному середовищі платформи ARIS (рис. 3.26).

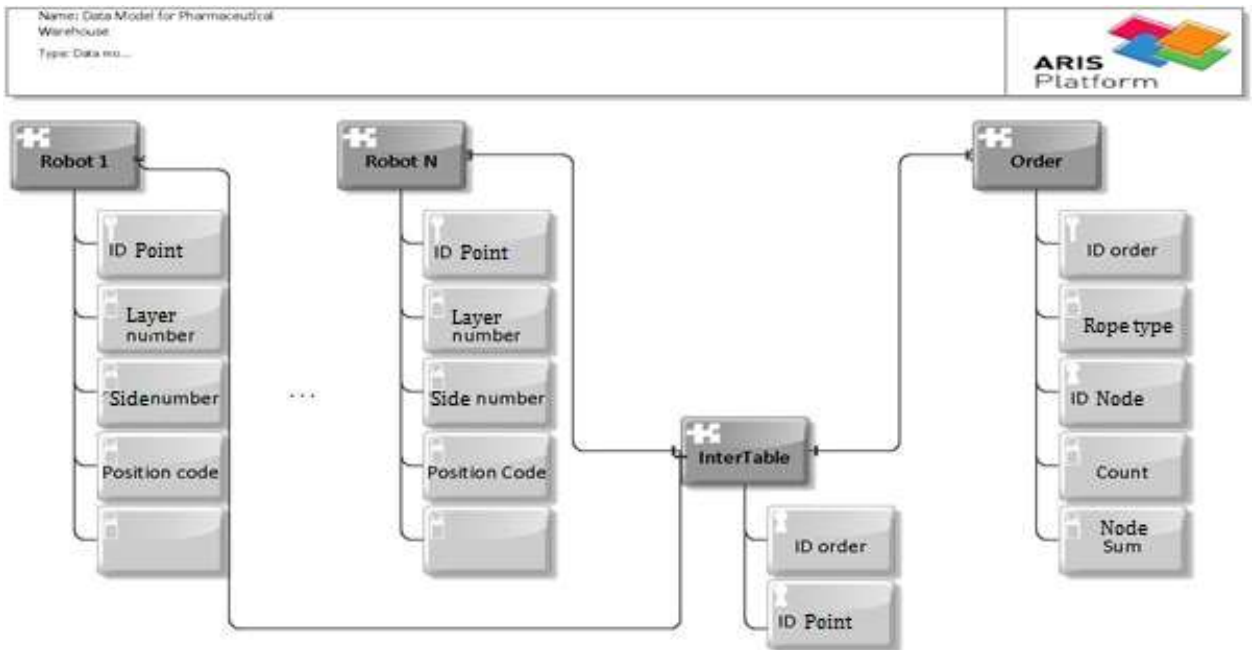


Рисунок 3.26 – Модель даних для N просторових коридорів

В задачах, які можна віднести до задач TSP, що вирішуються в розділених просторових коридорах, не можна обчислювати стійкі стани мережі БПА ітераційними методами (методами послідовних наближень) з обчисленням помилок. Необхідно всі коефіцієнти матриці (3.6) обчислювати за один цикл, після чого спільне завдання для зграї (групи) БПА розділяється на суб-завдання (кожне для свого суб-рою). На цьому етапі мережа переходить у стійкий стан, і в ньому залишається. Тобто, після розподілу суб-завдань між суб-роями БПА, ці завдання більше перерозподілятися не будуть до закінчення їх виконання.

Таке формулювання алгоритму найбільш близьке до алгоритму навчання мережі Хопфілда [74, 87]. Під час роботи НМХ ознакою знаходження рішення є такий стійкий стан, який збігається з одним із запам'ятованих при навчанні. З огляду на те, що місце розташування товарів на полицях не змінюється, колишні знайдені товари без похибок будуть знайдені в цьому ж місці.

Є сенс розглядати синхронний режим роботи НМХ. Якщо при виконанні суб-роєм з двох БПА завдання пошуку і вибору товарів, БПА в своєму просторовому коридорі переглянуті всі полиці відповідного стелажа по одну сторону коридору, тоді стани БПА одночасно (тобто синхронно) змінюються на нові, і вони можуть помінятися один з одним сторонами такого коридору. В

іншому випадку можливе зіткнення їх у просторі і колапс мережі. Таким чином, необхідно моделювати паралельну роботу БПА суб-рою, але послідовним алгоритмом.

Було змодельовано поведінку роїв БПА (по 2 БПА у суб-рою), кожен рій рухається у власному просторовому коридорі (рис. 3.27).

Факт виявлення зіткнень та уникнення зіткнень під час руху кожного БПА суб-рою необхідно моделювати окремо. Всі суб-рої мають різні напрямки руху. Продуктивність виконуваної роботи зростає, якщо розділити завдання між двома такими БПА одного суб-рою. Якщо територія виконання завдання всіма БПА (так званою зграєю або групою) має декілька розділених проходів (рядів) для переміщення, у кожному такому проході має працювати окремий суб-рій. Тоді швидкість виконання завдання всією зграєю збільшується.

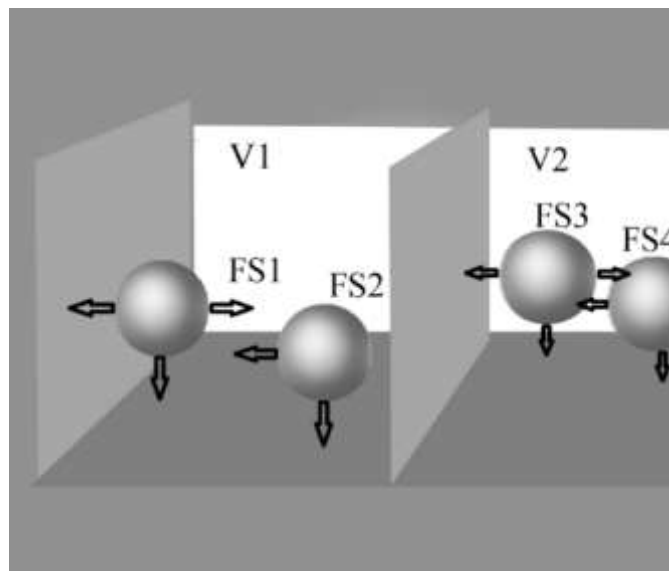


Рисунок 3.27 – Парний рух БПА

Один БПА виконує завдання не тільки на сусідніх полицях, а й на інших, завдяки своїй здатності обертання до 180 градусів.

Перераховані переваги підвищують продуктивність зграї та швидкість обробки запитів. Кінцевою операцією є видача зібраних товарів у вікно 6-RB; [292].

На рис. 3.28 показано моделювання процесу пошуку рішення за допомогою НМХ [127]. У деяких ситуаціях декілька механізмів, що рухаються один за одним

у коридорі, можуть бути конструктивно поєднані в один БПА [292, 301, 352].

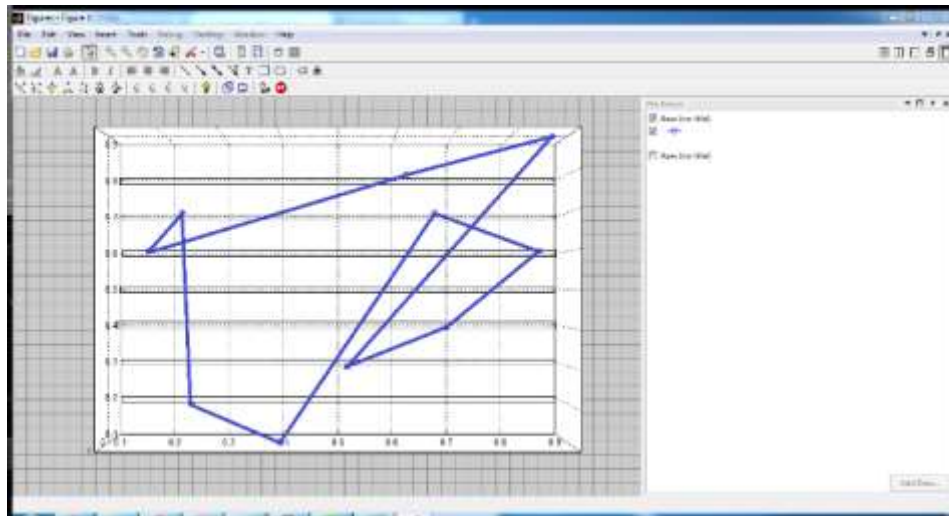


Рисунок 3.28 – Приклад рішення задачі TSP одним БПА з використанням мережі Хопфілда

На рис. 3.29 показано, що до значення 0,5 по осі абсцис БПА-1 (6-FS1) виконував 2D TSP по одній стороні просторового коридору 6-V1 (в цей час БПА-2 (6-FS2) виконував аналогічну задачу по іншу сторону цього ж коридору 6-V1. Після значення 0,5 БПА-1 змінив сторону коридору і продовжив виконувати своє суб-завдання 2D TSP на вертикальній площині другої сторони просторового коридору 6-V1.

З огляду на те, що в зазначеному прикладі використовувані БПА не є самостійними, а представлені парним механізмом однієї конструкції, то для побудови подібної траєкторії (див. рис. 3.28) для БПА-2 суб-рою необхідно мережу Хопфілда реалізувати з паралельними обчисленнями. У цьому випадку, щоб розрахувати положення БПА-2 (6-FS2), потрібно знати оновлене положення БПА-1 (6-FS1). Зрозуміло, що фізично неможливо розрахувати положення БПА-1 і положення БПА-2 в один і той же момент часу, так як стан БПА-2 залежить від положення БПА-1.

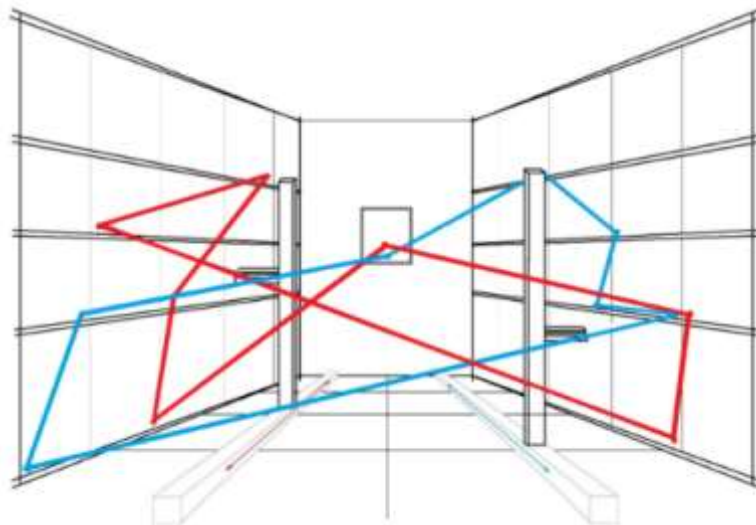
Тобто, при збільшенні кількості БПА в суб-рої для розрахунку положення кожного БПА потрібно знати оновлене і старе положення сусідніх БПА. Кількість тактів для передачі інформації щодо положень БПА збільшується при

збільшенні кількості сусідніх БПА, стан яких має враховуватися.

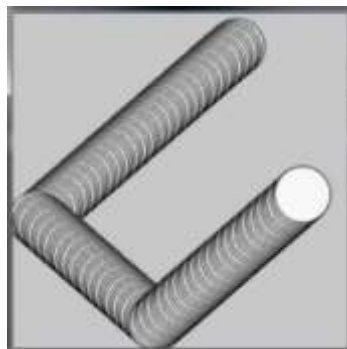
Все вищевикладене дозволяє говорити про використання мережі Хопфілда з асинхронним режимом.

За допомогою двох БПА (або спареної конструкції БПА) можна ефективно, швидко і без зіткнень обробляти два стелажі (рис. 3.28, а). Для моделювання такої ситуації доцільно кожен з БПА представити у вигляді сфери із заданим діаметром (рис. 3.29, б, в).

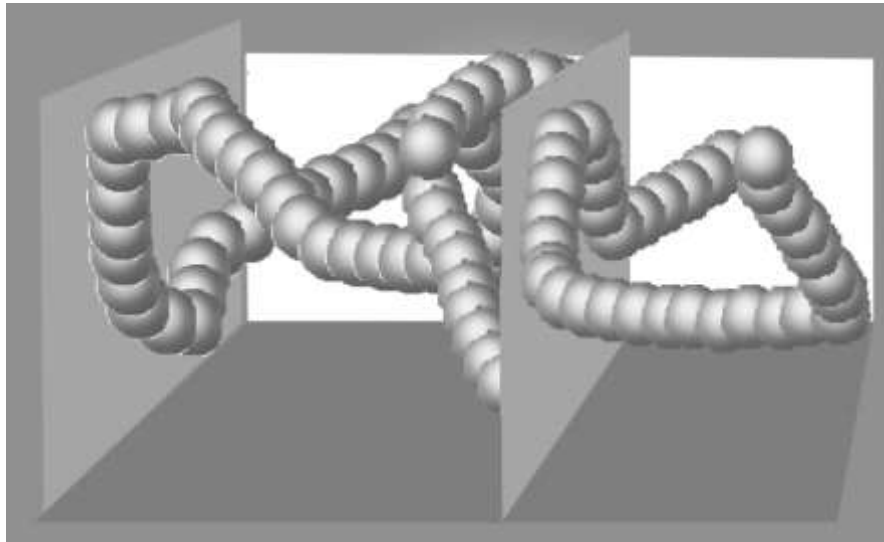
В такому разі TSP пропонується вирішувати окремо для сфери, що лінійно переміщується (НЕ котиться!) спочатку по одній бічній поверхні просторового коридору, а потім – для цієї ж сфери, яка переміщується по другій бічній поверхні цього ж коридору (рис. 3.29, в) . При переході сфери з однієї бічної поверхні на іншу внутрішні точки коридору в рішенні TSP не розглядаються. Таким чином, замість вирішення тривимірної 3D-задачі TSP, можна використовувати конкатенацію двох 2D-задач TSP.



а)



б)



в)

Рисунок 3.29 – Моделювання руху БПА у просторовому коридорі:
 а – «комівояжер» у вигляді просторової точки; б – «комівояжер» як коло;
 в – маршрути суб-роїв сферичних БПА у сусідніх просторових коридорах

При моделюванні руху БПА розглядаються три просторові координати:

- 1-ша координата: зліва або справа;
- 2-га координата: позиція цільової точки;
- 3-тя координата: номер сфери (технологічного механізму).

Моделювання поведінки підгрупи (суб-рою) може використовуватися на етапі підготовки для виконання завдання (моніторингу або технології) з оптимізацією руху об'єктів суб-рою в обмеженому просторі між сторонами та рівнями (наприклад, полицями стелажа відсіку фармаскладу) просторового коридору.

Таким чином, моделювання є дуже важливим при вивченні поведінки суб-роїв БПА; оскільки це дає можливість представити реальну систему, використовуючи запрограмовані математичні моделі, і дозволяє відображати динаміку системи, а також досліджувати поведінку сегментованої групи БПА.

Необхідно відзначити, що при такому підході пройдений суб-роєм шлях не буде мінімальним, і описане рішення є лише суб-оптимальним для TSP. Але використання НМХ дозволяє знаходити задовільні рішення досить швидко, без додаткового аналізу. Це робить можливим використовувати розроблений метод

формування траєкторії БПА (роботів, дронів й т. п.) суб-рою (з конкатенацією декількох 2D-рішень в 3D-просторі) в швидкодинамічних мережах, наприклад, таких як рій БПЛА.

Використання класичних методів, що дозволяють знаходити оптимальне рішення з використанням множинних ітерацій, може зажадати таких часових і обчислювальних ресурсів, які можуть привести до краху рою БПЛА при несвоєчасному отриманні корекції маршруту.

3.3.3 Моделювання траєкторії руху гетерогенної зграї БПЛА за складною траєкторією з визначенням циклів дозарядки акумуляторів

Користуючись моделлю, побудованою у пп. 2.1–2.2, поведінка зграї дронів може бути з достатньою точністю описана математично в просторово-часовому масштабі з двома параметрами моделі випадкового блукання. Переміщення суб-роїв і зграй БПЛА в географічних координатах можна оцінювати як супердіфузний процес. Проведені дослідження значно поліпшить якість прогнозів витрати батареї обмеженої потужності на борту БПЛА і, відповідно, та визначення зменшення часу активного польоту дронів в результаті прогнозованих (сила вітру, розряд батареї) та стохастичних (несподівані перешкоди у вигляді птахів, опор лінії електропередачі, кабелів і т. п.) зовнішніх впливів.

Необхідно зауважити, що у реальних умовах може знадобитись як досить довготривале детальне обстеження території з відеозйомкою, так і використання датчика вимірювання якогось одного параметра у певній координаті місцевості. Тому для моделювання групової поведінки дронів, що виконують різні за складністю завдання у певному сегменті мапи місцевості, було вибрано дві моделі БПЛА різного рівню складності та потужності (рис. А.1): DJI Phantom 4 (більш потужний та складний за функціоналом) та UDIRC LarkFPV (простіша модель). Зовнішній вигляд та характеристики обраних моделей наведені у додатку А.2.

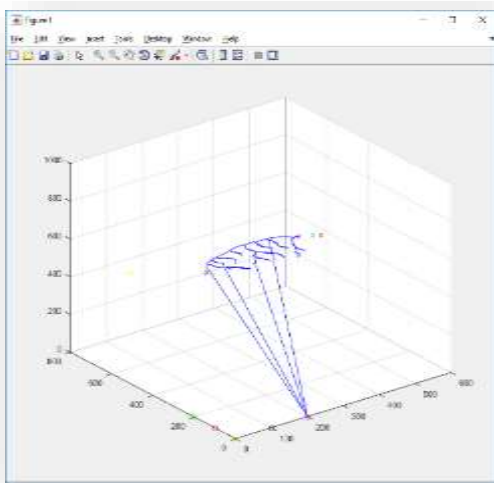
Для моделювання групового руху БПЛА у суб-рою з визначенням для

кожного дрона моменту своєчасного повернення БПЛА на точку старту для підзарядки акумуляторної батареї використані основні технічні характеристики зазначених моделей БПЛА (табл. А.2).

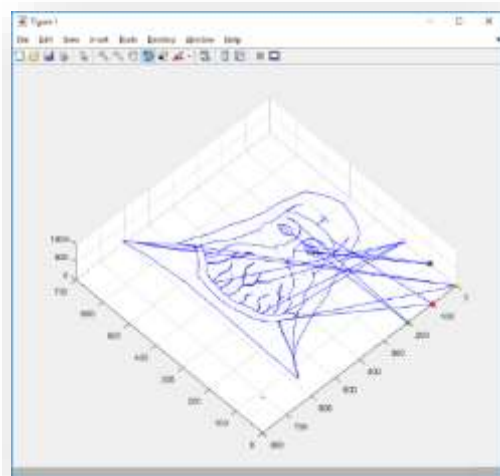
У середовищі MATLAB виконано моделювання групової поведінки суб-рою з 5 різних дронів: двох дронів моделі DJI Phantom 4 та трьох дронів моделі UDIRC LarkFPV.

Для того, щоб суб-рій з зазначених дронів облетів потрібну територію, потрібно зчитати з мапи (нп., з однієї з описаних у п. 1.6) координати точок, які мають бути відвіданими. Після цього можливе моделювання у середовищі MATLAB руху БПЛА за визначеними координатами (додаток Б.2).

Аналогічні дії необхідні для зчитування послідовності точок зі складного графічного рисунку, що задає траєкторії групової поведінки об'єктів рухомої мережі. Приклад повної непрямолінійної складної траєкторії одного та всіх дронів суб-рою наведений на рис. 3.30.



а)



б)

Рисунок 3.30 – Повна траєкторія одного дрона (а) та всіх дронів (б) з мінімізованими ділянками прямолінійного руху (початок та кінець маршруту кожного дрона – з однієї власної точки – марковані однаковим кольором)

Після того, як отримані всі координати траєкторії польоту кожного з дронів, у середовищі MATLAB можна відтворити візуалізацію групової взаємодії

дронів суб-рою. Приклад програми, з використанням якої моделюється політ суб-рою БПЛА за складною графічною траєкторією, наведений у додатку Б.2.

У програмі для кожного дрона задається максимальний час його польоту відповідно до технічних характеристик кожної з моделей БПЛА (табл. А.2). Коли час закінчується, дрон летить на свою базу (точку старту саме цього дрона), де йому змінюють або дозаряджають акумулятор. Після цього дрон повертається на свою попередню позицію та продовжує рух по власній траєкторії.

Результати моделювання групової взаємодій зазначених моделей 5 дронів в єдиному суб-рою наведені на рис. 3.31 – рис. 3.34.

На рис. 3.31 відображено початок руху дронів. Внизу на осях координат різнокольоровими кружечками та цифрами позначені бази для кожного дрона (стартова позиція та/або місце підзарядки акумуляторної батареї), хрестиками відповідного кольору та цифрами (у кожного дрона свій колір) позначені точки, звідки кожен з БПЛА починає рух.

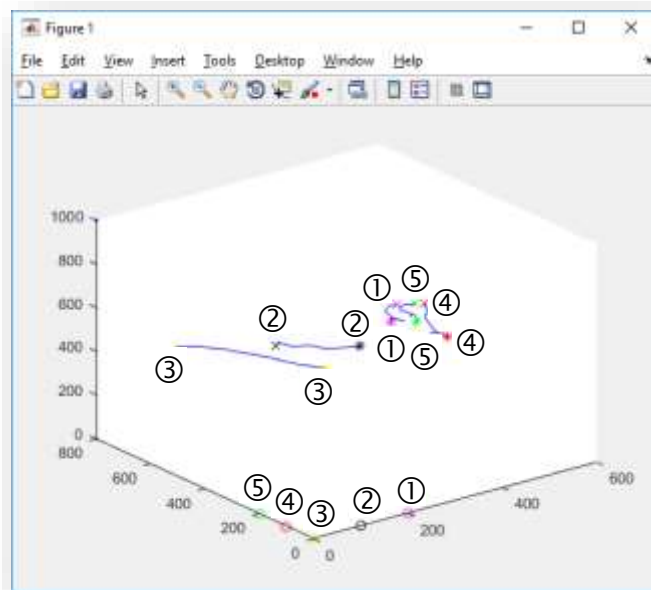
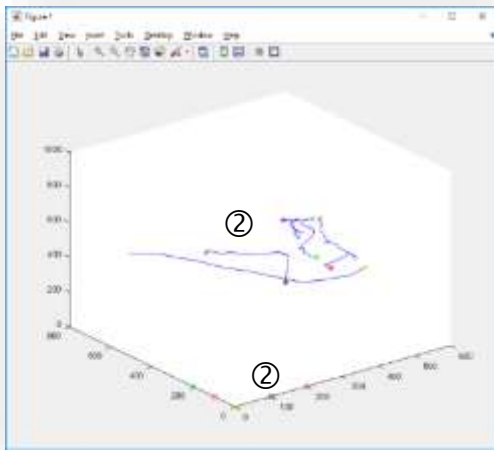
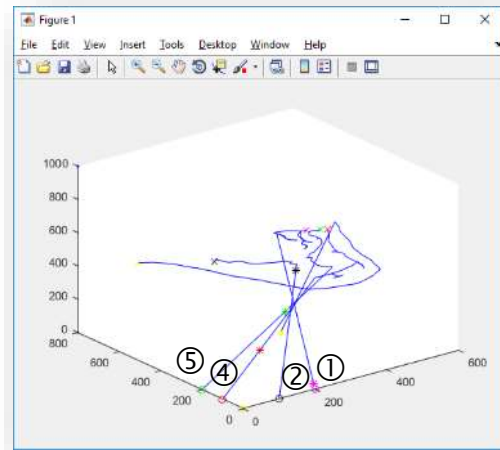


Рисунок 3.31 – Початкове положення дронів ① ② ③ ④ ⑤

На рис. 3.32, а видно, що у дрона, позначеного ②, закінчується заряд акумулятора (менше 17 %), та дрон прямує до своєї бази. Після підзарядки дрони повертаються кожен на свою попередню точку планового маршруту (рис. 3.32, б).



а)



б)

Рисунок 3.32 – Дрони у процесі підзарядки: дрон, помічений ②, рухається на власну базу для підзарядки (а); дрони ① ② ④ ⑤ повертаються на маршрут з власних баз після підзарядки (б)

Після того, як дрон облетів весь свій маршрут, він повертається на свою базу та знаходиться там до кінця роботи програми (рис. 3.33).

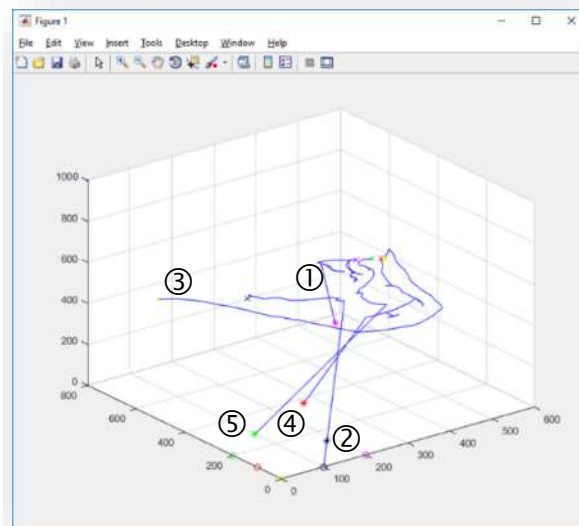


Рисунок 3.33 – Дрони ④ ⑤, помічені червоним та зеленим кольорами, прямують на власні бази після закінчення виконання завдань; чорний дрон ② знаходиться на базі, фіолетовий ① та жовтий ③ – в процесі виконання маршруту

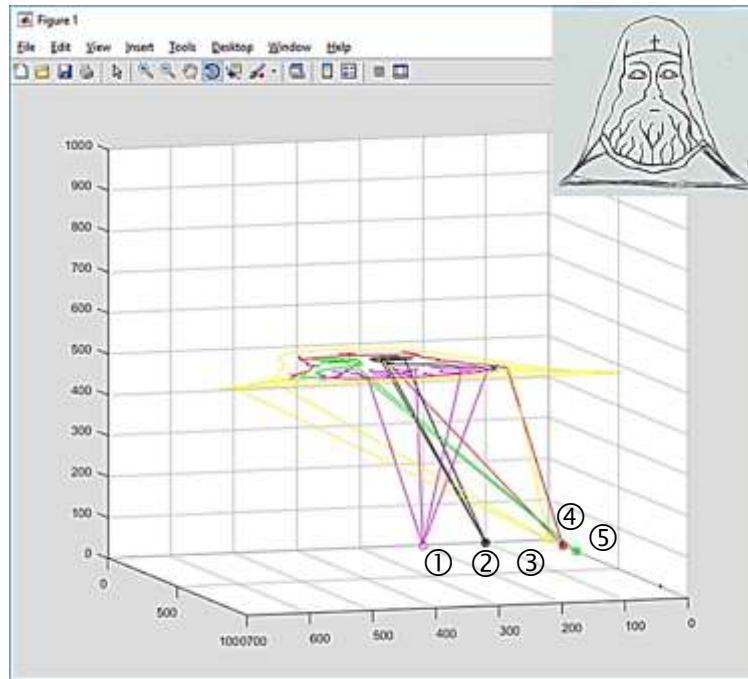


Рисунок 3.34 – Відображення циклів перезарядки батарей кожним з п'яти БПЛА (5 кольорів траєкторій) під час виконання завдання за складною траєкторією (справа зверху)

Якщо необхідний час функціонування зграї перевищує час використання заряду одної батареї БПЛА (див. додаток А.2), за результатами моделювання можливо визначити, скільки разів кожен дрон зі зграї повинен повернутися на базу для дозарядки акумуляторних батарей (рис. 3.34).

Складні траєкторії руху БПЛА, які ґрунтуються не на математичних, а на графічних залежностях, необхідні при використанні зграй дронів у районах бойових дій. Такі маршрути унеможливають прогнозування руху БПЛА та суттєво ускладнюють їх ліквідацію засобами протиповітряної оборони (ППО) у порівнянні з маршрутами, за якими відбувається прямолінійний рух дрона між точками маршруту.

3.4 Синтез маршрутів суб-роїв БПЛА на основі нейронної мережі Хопфілда у просторових коридорах на місцевості

Особливості організації групової взаємодії БПЛА на відкритій місцевості, за межами приміщення полягають у необхідності розподілення віртуальної мережі по географічній мапі регіону. Мапа може бути деталізованою з довільними

розмірами квадрата форми $r \times r$. При виборі великих значень параметра r , результуючі регіони мають менші розміри і рішення виходить більш точним. Така область є найменшою формою, із якою може працювати алгоритм, і розроблене рішення може бути використано для ряду регіонів та географічних ділянок, що пропонуються для прокладання шляху.

Мета НМХ полягає в тому, щоб отримати математичне представлення шуканого вирішення (маршруту), яке відповідає його графічній візуалізації. Рішення має надати баланс всіх факторів, їх цінності, умови, вимоги і т. д. Подальшою задачею є необхідність знайти рішення для прокладання суб-оптимального маршруту відносно географічної ділянки, що розглядається. Як результат, ця фаза дає на виході матрицю V розмірністю $r \times r$, заповнену значеннями «0» або «1». Значення «1» вказує на те, що дану ділянку можна розглядати як точку маршруту, в той час як «0» вказує на протилежне. Залежно від моделі рельєфу і точності, з якою розробляється класифікація, отримане рішення є більш-менш детальним.

Основними етапами роботи НМХ, що використовується для планування шляху БПЛА, є:

1. Знайти суб-оптимальне рішення на основі декількох чинників.
2. Збалансувати всі входи і визначені умови найкращим чином.
3. З'єднати початкову і кінцеву точки, в унікальному шляху, без переривання.
4. Переконатись, що кожній під'єднаній області присвоєне числове значення для кожного з факторів, на основі яких виконується синтез маршруту.
5. Забезпечити перевагу певних входів згідно з побажаннями розробника маршруту.
6. Забезпечити безумовне проходження через пов'язані між собою області, або їх перевизначення, якщо є така необхідність.
7. Підтримати роботу з довільним числом взаємопов'язаних областей.
8. Включити кожний з факторів, які слід класифікувати в довільне число поділок.

9. Забезпечити можливість вибору точності і швидкості реалізації шляхом зміни параметрів НМХ.

10. Переконатись, що, в разі будь-якої несправності, є можливість перервати пошук суб-оптимального шляху, та інформувати користувача.

Основними перевагами нейронної мережі є низька обчислювальна потужність і здатність зберігати модель, як тільки мережа була навчена. До того ж, це робить непотрібними попередні знання, тому що мережа може навчатися. Перевагою НМХ є також можливість апаратної реалізації.

Процес ідентифікації має вирішальне значення для контролю, що забезпечує автономію БПЛА. Моделі управління мають бути протестовані з використанням імітаторів, і у випадку, якщо ідентифікація була точною, вони будуть мати більш високу продуктивність в реальних умовах.

Проведене дослідження зосереджене на контрольованих нейронних мережах, які потребують моделі навчання для регулювання їх параметрів таким чином, щоб виходи мереж стали якомога ближчими до навчальних шаблонів. Після того, як мережа була скоригована відповідно до навчальної моделі, вона готова до використання і її параметри більше не будуть модифікуватись.

Таким чином, дуже важливо ретельно вибирати навчальні зразки, використовуючи найбільш підходящі шаблони для різних станів системи.

Найбільш ефективною для вирішення поставлених задач можна вважати гібридну мережеву архітектуру, яка об'єднує в собі якості рекурентної та нерекурентної мереж (рис. 3.34).

Для вирішення проблеми прокладання суб-оптимального шляху у контексті пересування БПЛА по місцевості потрібно виконати деякі коригування, котрі повинні бути проаналізовані на гібридній мережі.

Політ БПЛА заснований на орієнтації у просторі та на швидкості. По-перше визначаються причини, що призводять до зміни положення БПЛА. Таким чином, існують два етапи моделювання: перший складається з моделювання положення на основі команд, що посилаються до БПЛА, а другий складається з імітації позиції, заснований на положенні і попередніх станах.

Можна використати два різних методи для навчання контрольованої мережі. У першому з них, обидві системи з'єднуються каскадно, і їхній вихід використовується для навчання системи позиціонування. У другому, здійснюється паралельне навчання обох систем, але ця архітектура не бере до уваги помилку, коли дані йдуть з виходу першої мережі до входу наступної. Саме з цієї причини прийнято використовувати перший метод.

Модель структури гібридної НМХ доцільно модифікувати за рахунок введення додаткового модуля аналізу географічних координат (рис. 3.35).

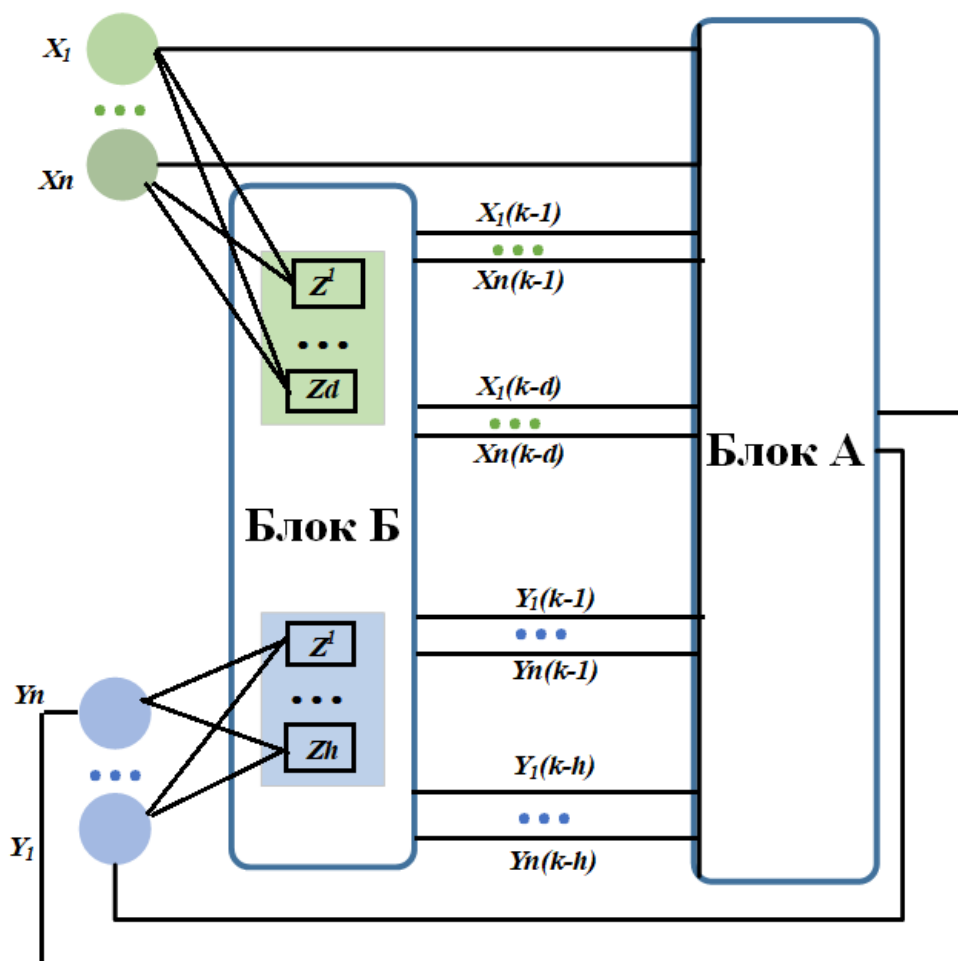


Рисунок 3.35 – Гібридна мережі Хопфілда

На рис. 3.36 наведена каскадна архітектура навчання системи польоту БПЛА. Для навчання використовуються дані, отримані з курсовертикалі – системи визначення курсу та просторового положення (AHRS), від GPS, від радіопередавача і шаблони, використані при навчанні.

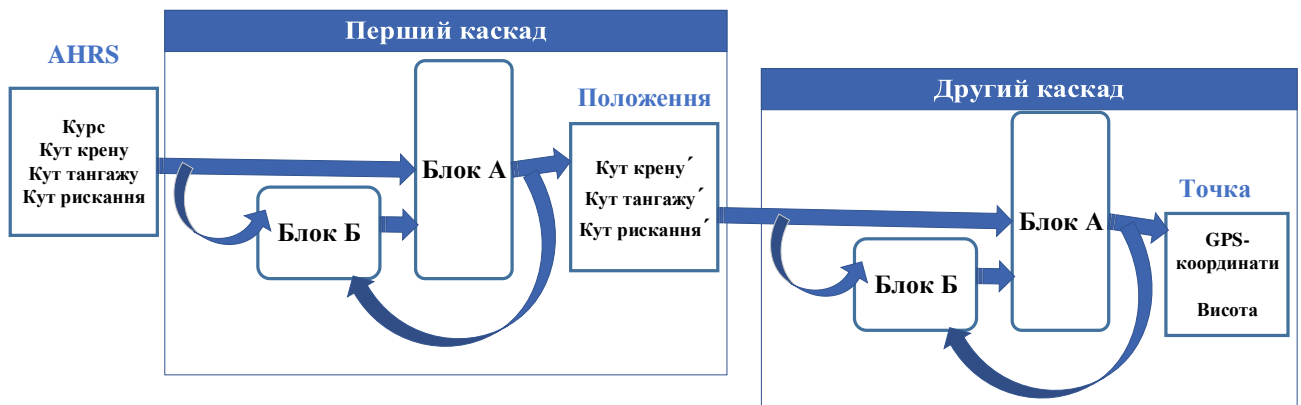


Рисунок 3.36 – Каскадна архітектура навчання

Шаблоном для навчання є вектор \vec{T} (3.21), який показує стан, отриманий від GPS.

$$\vec{T} = [x(t), y(t), z(t)]. \quad (3.21)$$

Після того як система навчилася, моделювання працює послідовно, визначаючи положення, виходячи з відношення, тому ефективно працювати з каскадною архітектурою. Потреби в використанні вихідного сигналу системи в якості вхідних даних для наступного положення передбачають можливість поширення помилки від відношень у мережі до її позицій. Такий метод навчання приймає цю помилку до уваги і виправляє її в відношеннях системи.

При порівнянні \vec{T} (3.7) і \vec{T} (3.13) для корекції повторюваних мережевих параметрів, помилки, що утворюються на виході, розглядаються як вхідний параметр x для рівняння (3.22):

$$\vec{T} = [x'(t), y'(t), z'(t)]. \quad (3.22)$$

Таким чином, за результатами досліджень з існуючого математичного апарату був обраний ефективний метод динамічної ідентифікації таких систем, як БПЛА, на основі контрольованої НМХ та досліджені умови його застосування для цього класу задач.

Процес планування маршрутів БПЛА повинен виконуватись якщо не оптимальним чином, то таким, що забезпечує виконання низки задач всією зграєю з найменшою витратою обчислювальних та енергоспожитих ресурсів. Ефективним в такому разі може бути метод синтезу маршрутів суб-роїв, з яких складається зграя дронів, на основі НМХ.

Метою є створення такого методу синтезу маршрутів суб-роїв зграї, який забезпечить вирішення задачі комівояжера з виключенням дубляжу виконання задач у вузлах, якими промаркована досліджувана територія, та з суттєвим прискоренням синтезу маршрутів БПЛА у порівнянні з існуючими методами. Необхідність досягнення зазначеної мети обумовлена обмеженістю енергоресурсів дронів, що не дозволяє виконувати великий обсяг обчислень, якого потребує застосування класичних методів вирішення задачі TSP. Актуальність досліджень підвищується, якщо завдання обстеження територій пов'язані з надзвичайними ситуаціями та потребують негайних рішень в надзвичайно обмежені строки.

Наочними задачами, для вирішення яких доцільно застосовувати зграї (рої) невеликих дронів з обмеженими обчислювальними та енергоресурсами, наприклад, є вирішення задач агросектору, огляд технічних споруд, моніторинг метеопказників, поширення тріщин при землетрусах, води – при повенях тощо. В подібних задачах завжди актуальними є питання визначення маршруту з моніторингом певних характеристик у визначених вузлах на чітко обмеженій території. Такий маршрут повинен бути, якщо й не оптимальним, але мінімальним за часом та довжиною траєкторії для прийняття своєчасних рішень.

Якщо ці умови не будуть виконані, можливі два варіанти критичного закінчення маршруту зграєю дронів:

- невиконання задачі обстеженні всіх заданих точок маршруту;
- неповернення чисельних дронів до місця вильоту через зіткнення або закінчення ресурсу елементів електроживлення на борту дронів.

Враховуючи вищенаведене, задача моніторингу характеристик території з чітко визначеними розмірами може бути приведена до класичної задачі

комівояжера з нетрадиційним шляхом вирішення останньої.

Розглянемо моделювання групової поведінки зграї дронів з урахуванням розбиття їх на суб-рої, які виконують аналогічні задачі в обмежених просторових коридорах.

Для економії обчислювальних ресурсів і продовження життя зграї поведінку дрона-«комівояжера» пропонується описувати лише в географічних координатах (lat_{ij}, lon_{ij}) , тобто, вирішувати 2D-задачу TSP. Висота h , на якій повинен переміщатися кожен окремий суб-рій, фіксується в залежності від рельєфу місцевості, над якою працює суб-рій. При такому підході повинна вирішуватися 2D-задача комівояжера в кожному просторовому коридорі, в якому працює окремий суб-рій [136]. На відміну від [136] пропонується в розробленому методі формувати просторові коридори (блоки польотної карти) не прямокутними, а достатньо довільної форми з суміжними межами, без дублювання членства вузлів у суміжних блоках.

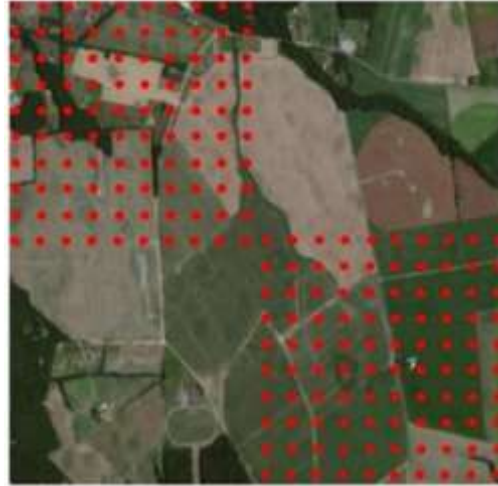
Попадання будь-якого m -го дрона n -го суб-рою в точку з координатами (lat_{ij}, lon_{ij}) визначається або за GPS-координатами, або (за відсутністю зв'язку) порівнянням знімків фотокамери дрона з об'єктами з точною локалізацією, виявленими за Google або Apple-мапами. Отже, вхідними даними є масив опорних точок, через які повинен пролетіти окремий дрон (або суб-рій). Для кожного n -го суб-рою вказана точка вильоту PF_n , яка також є точкою фінішу.

Розглянемо план місцевості, який покривається декількома координатними сітками з K рівномірно нанесеними в лінію контрольними вузлами на чітко визначеній відстані L (рис. 3.37, а).

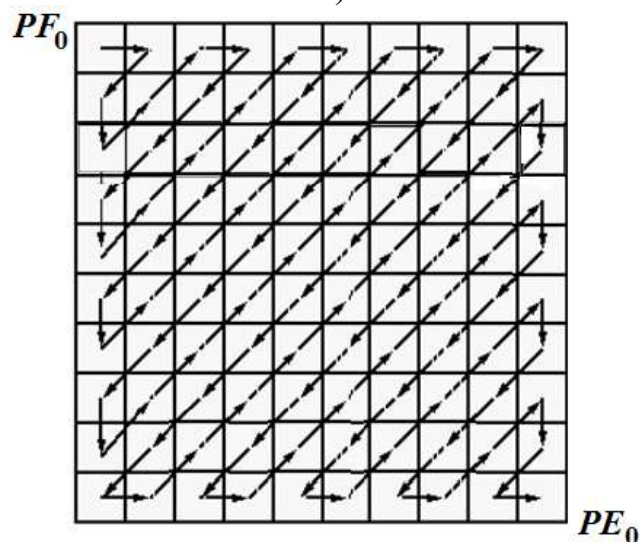
Кожна координатна сітка – це квадрат 10×10 вузлів, який є планом одного польоту зграї дронів. Кількість суб-роїв в зграї, точки вильоту кожного суб-рою, висота польоту кожного суб-рою і відстань між вузлами, в яких повинні бути виконані технологічні або моніторингові завдання, визначається оператором цієї КФС перед кожним вильотом.

Якщо задача обстеження території виконується окремим БПЛА, з вильотом у точці PF_0 та закінченням завдання у точці PE_0 (рис. 3.37, б), то загальна вартість

такого маршруту становить приблизно 2620, якщо вважати, що ваговий коефіцієнт переміщення дрона між вузлами P_{ij} координатної сітки по прямій становить $w_{ij} = 1 k$, а по діагоналі – $w_{ij} = 1,4 k$, де k – коефіцієнт, що динамічно змінюється в залежності від швидкості переміщення дрона.



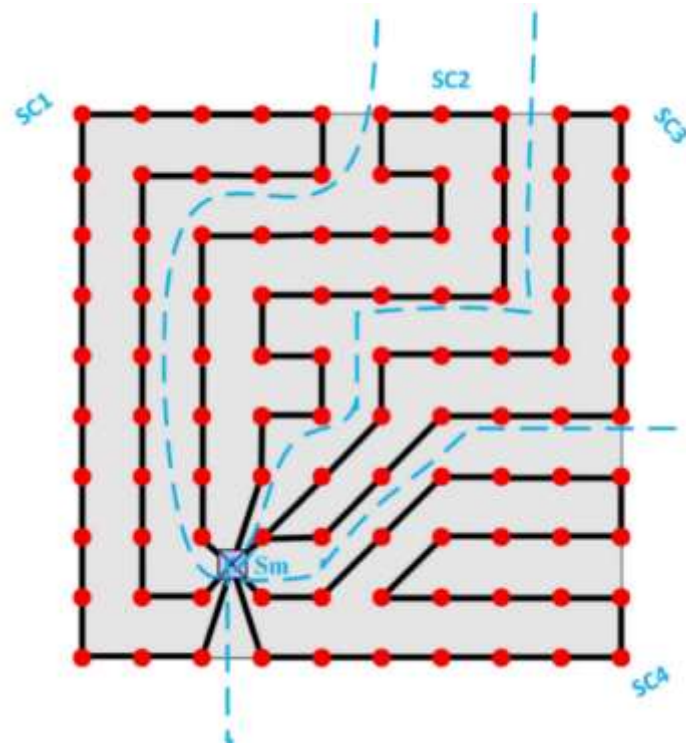
а)



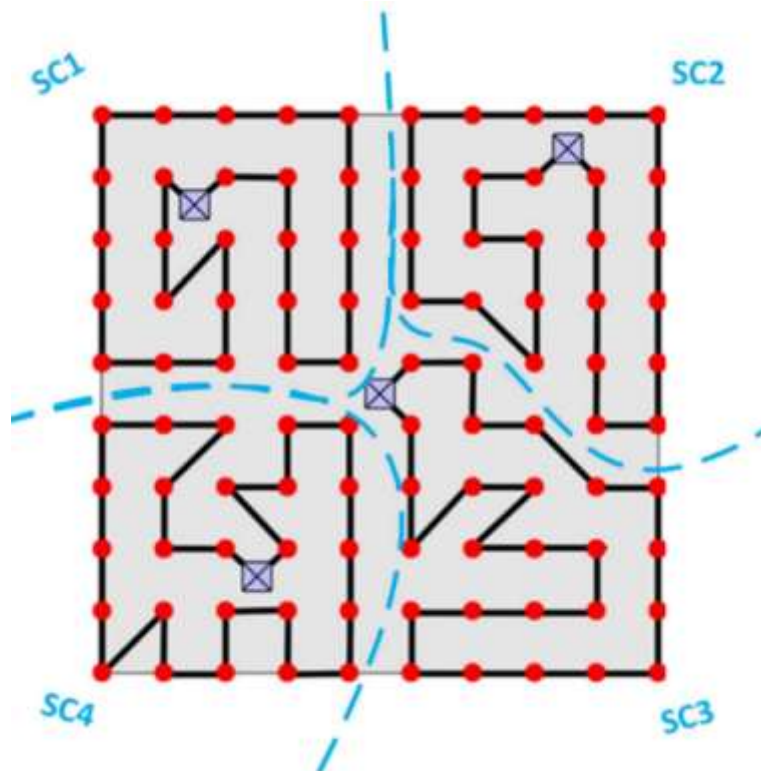
б)

Рисунок 3.37 – Координатні сітки на мапі місцевості (а) та маршрут обстеження її одним БПЛА (б)

Для прискорення обстеження мапи місцевості, вкритої декількома координатними сітками (див. рис. 3.37, а), доцільно використовувати зграю дронів, поділену на декілька суб-роїв N , з кількістю M_n дронів в n -му суб-рої. Для кожного суб-рою складається окрема польотна карта в межах однієї координатної сітки, що відповідає одному вильоту зграї. Пропонується для роботи кожного n -го суб-рою формувати просторовий коридор SC_n довільної форми.



а)



б)

Рисунок 3.38 – Розбиття координатної сітки польотів на просторові коридори SC_n при $N = 4$: а – при спільній точці PF_0 вильоту дронів (B_{ij});
 б – при рознесених точках вильоту PF_n

Алгоритм має розуміти варіанти різного положення точок вильоту безпілотних літальних апаратів: виліт всіх суб-роїв з одної спільної точки PF_0 (рис. 3.38, а), або з різних точок вильоту $PF_1 \dots PF_N$ (рис. 3.38, б).

В залежності від кількості та положення точок вильоту кожного суб-рою зграї кожна координатна сітка розділяється на просторові коридори SC_n (див. рис. 3.38). У наведеному прикладі кількість таких коридорів становить $N=4$. В кожному коридорі працює один суб-рій з кількістю дронів один або більше (максимальна кількість дронів у зграї M). Кожен вузол координатної сітки входить лише в один просторовий коридор.

Тоді площа території, яка буде обстежена за один виліт зграї дронів, залежить від відстані L між кожними двома сусідніми вузлами та кількості вузлів K :

$$S = (K - 1)^2 \cdot L^2. \quad (3.23)$$

Ідея пропонованого методу полягає в тому, щоб використовувати польотну карту також у якості нейронної мапи як динамічне представлення заданого простору, інформація про який надходить із зовнішніх джерел. Енергетичні взаємодії нейронів в мережі подібно поширенню хвилі збурень призводять до формування так званого ландшафту активації, який використовується в подальшому як навігаційна мапа для планування траєкторії. Такий підхід забезпечить виключення дубляжу дій дрона у вже обстеженому вузлу. Навіть, якщо дрон B_{mn} потрапить не в свій просторовий коридор SC_n (наприклад, буде знесений вітром), він не буде виконувати задачу у вузлах стороннього просторового коридору.

«Нейрон» в даному випадку бачиться обчислювальним процесом, якому привласнений певний стан таким чином, що мережа може працювати паралельно.

Дискретна повнозв'язна НМХ складається з одного шару бінарних нейронів, кожен з яких пов'язаний з рештою нейронів і має мережеві вхід і вихід (рис. 3.39, а). Координати цілі (вузли координатної сітки), а також інформація, чи є ці вузли вже обстеженими, надходять на вхід НМХ (рис. 3.39, б), яка являє собою шар адаптивних суматорів із зворотними зв'язками, вихідні сигнали яких

надходять з часовою затримкою Δt_{ij} на входи нейронів, в результаті чого вихідний сигнал НМХ формується лише після того, як мережа досягне динамічної рівноваги [335].

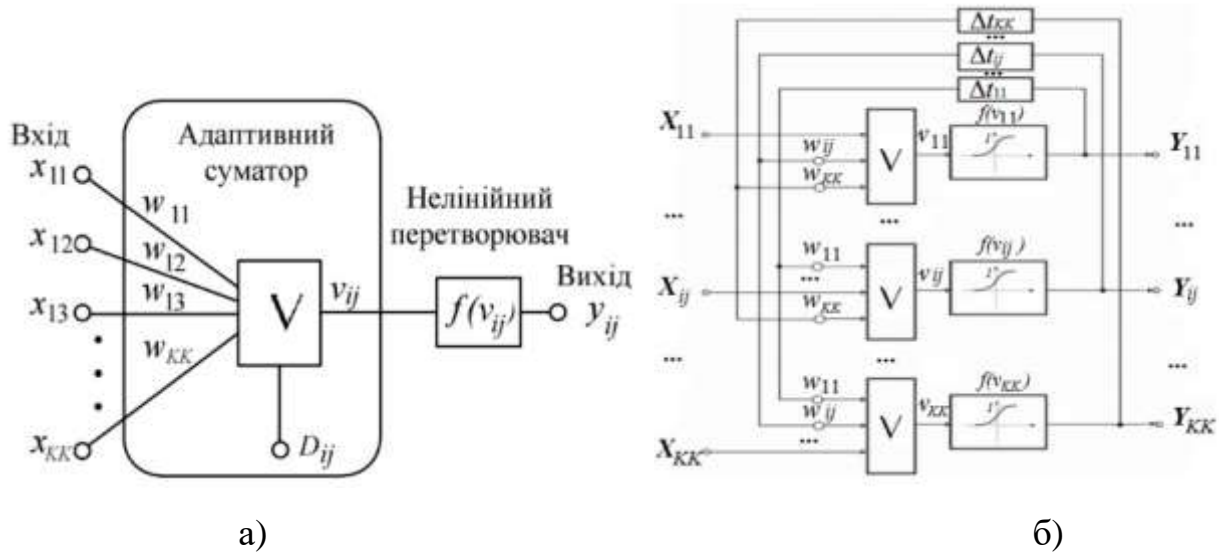


Рисунок 3.39 – Графічне зображення нейрону (а) та НМХ (б)

Математично подібний нейрон (див. рис. 3.39, а) описується за допомогою системи рівнянь (3.24):

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{ij} = f(v_{ij}); v_{ij} = \sum_{i=1}^{K,K} x_{ij} \cdot w_{ij} + D_{ij}; \\ D_{ij} = 1, P_{ij} \notin SC_n; D_{ij} = 0, P_{ij} \in SC_n; \\ w_{ij} = 1, \text{якщо довжина маршруту між вузлами } L; \\ w_{ij} = 1,4, \text{якщо довжина маршруту між вузлами } \sqrt{L^2}. \end{array} \right. \quad (3.24)$$

Початковий бінарний рівень нейрону D_{ij} задається оператором КФС та дорівнює «1», якщо нейрон (вузол польотної карти) не входить до нейронної мапи суб-рою; дорівнює «0», якщо вузол підлягає обстеженню дроном даного суб-рою.

Штучна НМХ «навчається» рішенням задачі диз'юнкції матриць стану вузлів польотної карти (нейронів нейронної мапи), що, по суті, зводиться до приведення стану всіх нейронів до «1», коли всі вузли польотної карти будуть

обстежені. Тобто, у разі здійснення дроном у вузлі P_{ij} вимірювання будь-якої характеристики, фотографування місцевості та ін., вихідна функція $f(v_{ij})$ обчислювального процесу на відповідному ij -му нейроні, встановлюється в «1» і передається за правилами НМХ на входи всіх нейронів суб-рою. Якщо інший дрон попадає в точку з такими координатами, обчислювальний процес в цьому дроні не активується, тому що характеристики цієї точки вже виміряні та це відображено у нейронній карті.

Добуток всіх зважених входів $(x_{ij} \cdot w_{ij})$ наприкінці задачі повинен бути ненульовим, враховуючи, що в кожній цільовій точці подія відбулася.

Таким чином, виключається дублювання події в кожній точці обстежуваної території, економляться обмежені обчислювальні ресурси комп'ютерних компонентів дронів, економиться електроживлення і відповідно збільшується час життя зграї.

При плануванні маршруту суб-рою на основі розподіленої НМХ кожен з дронів суб-рою формує власну нейронну карту і виконує її динамічне коригування за початковими даними і за інформацією від датчиків на дроні. Сформовану нейронну карту дрон по каналу зв'язку передає всім доступним дронам зграї. У процесі руху дрон отримує нові «знання» про проведені дослідження у вузлах координатної сітки і відповідно до них коригує нейронну карту.

Кількість таких координатних сіток на мапі обстежуваної території відповідає кількості вильотів зграї дронів для виконання поставленої задачі з обстеження досліджуваної поверхні.

На початку роботи алгоритму на основі польотної карти створюється її бінарна модель – квадратна матриця подій K -го порядку, де K – кількість опорних точок в одній стороні побудованої квадратної координатної сітки, що покриває частину обстежуваної території за топологією РММ, наведеною на рис. 3.16, а, яка можлива для моніторингу протягом одного вильоту зграї дронів. У перетину i -го рядка та j -го стовпця даного масиву записуються «0», якщо точка входить n -го з N просторових коридорів SC_n , та «1», якщо точка не входить до цього

коридору (тобто, для даного суб-рою точка вважається вже обстеженою). Ця ж бінарна модель польотної карти – матриця A – є нейронною мапою НМХ (3.25).

$$A = \left\| a_{ij}^{(n)} \right\|_1^K = \left\| \begin{array}{cccc} a_{11}^{(1)} & \cdots & a_{1j}^{(n)} & \cdots & a_{1K}^{(n)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1}^{(n)} & \cdots & a_{ij}^{(n)} & \cdots & a_{iK}^{(n)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{K1}^{(n)} & \cdots & a_{Kj}^{(n)} & \cdots & a_{KK}^{(N)} \end{array} \right\|, \quad (3.25)$$

На другому етапі згідно з запропонованим методом для кожного n -го суб-рою складається окрема нейронна мапа НМХ A_n за правилами (3.26).

$$\left\{ a_{ij}^{(n)} \mid n = \overline{1, N}; a_{ij}^{(n)} \mid i = \overline{1, K}; a_{ij}^{(n)} \mid j = \overline{1, K} \right\}; \quad (3.26)$$

$$a_{ij}^{(n)} = 0, \text{ якщо } a_{ij} \in SC_n; a_{ij}^{(n)} = 1, \text{ якщо } a_{ij} \notin SC_n.$$

Тобто, якщо $a_{ij}^{(n)} = 1$, то такий вузол для n -го суб-рою вважається вже обстеженим.

На третьому етапі виконується синтез маршрутів дронів суб-рою в межах кожного n -го просторового коридору.

При технічній реалізації такої топології РММ на основі зграї БПЛА, що складається з суб-роїв, необхідно розглядати ряд обмежень. Після вимірювань та/або відеомоніторингу та/або виконання інших технологічних процесів стан даного вузла в матриці (тобто нейрона матриці Хопфілда) змінюється з «0» на «1» (ставиться ознака, що вузол обстежений). Такий стан нейронної мережі з виходу обстеженого вузла – фактично з RF-передавача (Radio Frequency) БПЛА – передається на входи всіх інших вузлів, тобто всім БПЛА, в яких би вони вузлах не знаходились в даний час. Таким чином, вхідні сигнали потрапляють на всі нейрони, а вихідними можуть бути сигнали як з усіх нейронів, так і з частини нейронів після декількох циклів функціонування. Тобто, нейронна мапа НМХ поновлюється з деякими часовими затримками Δt_{ij} .

Робота алгоритму завершується, коли вже виконаний обліт всіх опорних

точок кожного просторового коридору, а також відома довжина шляху кожного маршруту. Маршрут являє собою масив послідовності опорних точок, причому найперша і остання точка – це завжди буде точка вильоту дрона (суб-рою) зграї.

У нашому випадку, коли в зграї використовується 6 БПЛА, що працюють у складі 4 суб-роїв в 4 просторових коридорах SC_1 – SC_4 , можна нарахувати 15 зв'язків у повнозв'язному площинному (2D) графі (рис. 3.40).

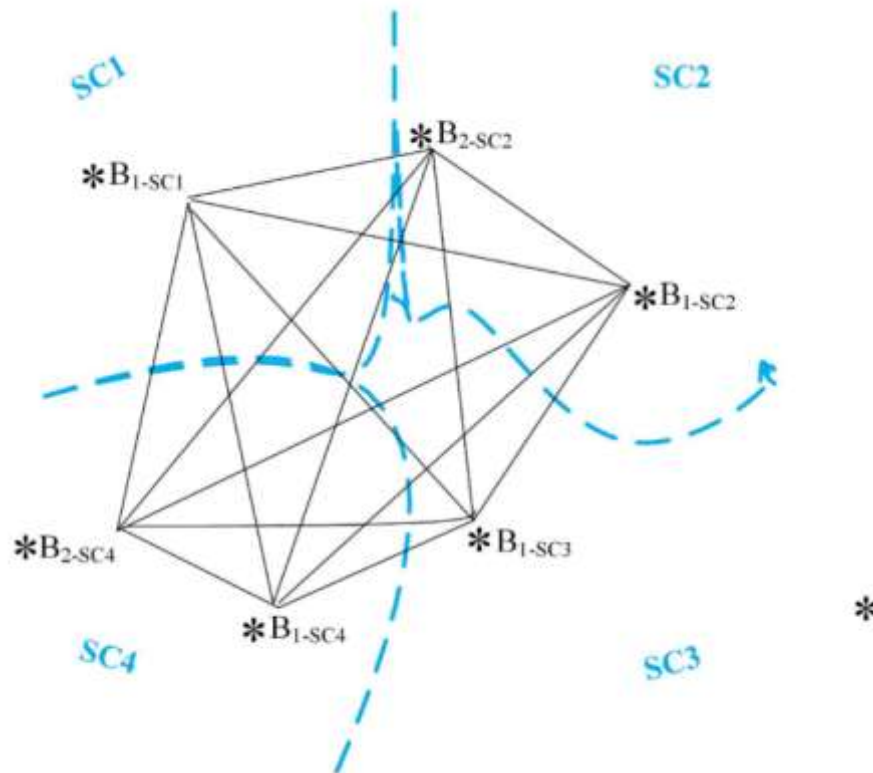


Рисунок 3.40 – Повнозв'язний граф для $M=6$, $N=4$

В загальному випадку кількість зв'язків у наведеній топології РММ можна розрахувати за формулою $N*(N-1)/2$, де N – загальна кількість дронів у зграї. Це означає, якщо для обстеження частини території з 100 координатних вузлів випустити зграю з 100 дронів, то при цьому потрібно забезпечити 4950 бездротових зв'язків. Навіть якщо врахувати необхідність використання трансферних вузлів для передачі даних на вхід всіх нейронів НМХ (окрім вузла-передавача) при відсутності прямої електромагнітної видимості між дронами або при перевищенні можливої дальності сигналу [9], наявних обчислювальних та телекомунікаційних ресурсів на борту дронів розглянутої мережі буде недостатньо.

З матриці у (3.29) та рис. 3.28 видно, що просторові коридори SC_3 та SC_4 ще не обстежені. Якщо у результаті критичного застосування дрони в зазначених коридорах втрачені, тоді оператором КФС повинні бути перевизначені початкові змінні D_{ij} нейронам карт A_1 и A_2 НМХ, і дрони, які звільнились від виконаних завдань у просторових коридорах SC_1 та SC_2 , повинні бути направлені у просторові коридори SC_3 та SC_4 .

Алгоритм закінчується, коли всі значення матриці A повністю обстеженої координатної сітки частини досліджуваної території стають одиничними.

Таким чином, поведінка кожного суб-рою присвячена вирішенню єдиної для такого суб-рою задачі – виконанню будь-якої технологічної функції та/або моніторингу характеристик території у призначеному цьому суб-рою просторовому коридорі чітко визначених розмірів та конфігурації, з обов'язковим вимірюванням характеристик (виконанням технологічних функцій) в кожному з наявних на координатній сітці вузлів.

Кожен з цих дронів буде абсолютно автономною одиницею, яка буде в змозі приймати свої власні рішення і виконувати дії. Але кожен дрон буде в змозі «спілкуватися» з рештою дронів суб-рою, наслідуючи, таким чином, поведінки рою бджіл і виконуючи спільне завдання.

НМХ може бути корисною в цьому випадку для того, щоб жоден вузол не був обстежений двічі. Для цього треба скористатися властивістю мережі Хопфілда, що з виходу кожного з нейронів подається сигнал на входи всіх інших нейронів. Тоді факт виконання дії (вимірювання, фотографування тощо) у вузлі координатної сітки кожним дроном стає відомим решті дронам суб-рою, й такий вузол викреслюється з числа опорних точок, відповідний нейрон переходить в нульовий стан, і дрон не виконує повторної дії в такому вузлу.

Таким чином, глобальні рішення щодо обстеження вузлів координатної сітки приймаються «зграєю» на основі всіх наявних колективних даних. Завдяки цьому суб-рій є універсальним утворенням, що добре пристосовується до групової поведінки членів суб-рою (БПЛА) та слабо чутливе до втрати деяких

його членів. Зграя, що поділена на суб-рої, може втратити деяку кількість дронів, але все ж залишиться здатною до виконання завдання з обстеження частини мапи місцевості, обмеженої координатною сіткою з поділом на просторові коридори.

Проведені експерименти підтвердили працездатність і практичну застосовність запропонованого методу. Результати планування маршрутів дронів суб-роїв наведені у табл. 3.5 й табл. 3.6. У табл. 3.5 наведені результати застосування запропонованого методу з топологією мережі, де для кожного суб-рою власна окрема точка вильоту, за умови застосування дронів зі швидкістю польоту 5 м/с та відстанню між вузлами координатної сітки $L = 100$ м.

У табл. 3.6 наведені аналогічні дані для БПЛА, які мають спільну точку вильоту.

Таблиця 3.5 – Результати методу з різних точок вильоту БПЛА

№ суб-рою (просторового коридору)	№ точки вильоту БПЛА	К-сть БПЛА	К-сть вузлів маршруту (разом/розподіл між БПЛА)	Середній час виконання задачі суб-роєм, хв	Загальна вартість маршруту
SC ₁	PF ₁	1	25/25	8,9	268
SC ₂	PF ₂	2	25/13 і 12	4,0	268
SC ₃	PF ₃	1	25/25	8,5	256
SC ₄	PF ₄	2	25/13 і 12	3,9	252
РАЗОМ:		6	100	23,3	1044

Таблиця 3.6 – Результати методу з одної точки вильоту БПЛА

№ суб-рою (просторового коридору)	№ точки вильоту БПЛА	К-сть БПЛА	К-сть вузлів маршруту (разом/розподіл між БПЛА)	Середній час виконання задачі суб-роєм, хв	Загальна вартість маршруту
SC ₁	PF ₀	1	28/28	9,3	278
SC ₂		2	27/14 і 13	4,5	264
SC ₃		1	22/22	7,9	236
SC ₄		2	23/12 і 11	4,3	240
РАЗОМ:		6	100	26,0	1018

З аналізу табл. 3.5 –табл. 3.6 видно, що запуск суб-роїв з різних точок вильоту скорочує час обстеження території на 10,4%. Але при цьому загальна вартість маршруту зростає на 2,6 %. Це означає, що в такому разі треба приділяти більше уваги питанням оптичної навігації, більш точному позиціонуванню БПЛА при здійсненні складного маневрування між вузлами координатної сітки. Необхідно передбачити режим повернення БПЛА на початкову позицію.

Треба відзначити, що при такому підході пройдений суб-роєм шлях не буде мінімальним, і описане рішення є лише суб-оптимальним для TSP. Але використання мережі Хопфілда дозволяє знаходити задовільні рішення досить швидко, без додаткового аналізу. Це робить можливим використовувати розроблений метод синтезу маршруту відокремленої групи безпілотних апаратів (з конкатенацією декількох 2D-рішень у 3D-просторі) у швидкодинамічних мережах, наприклад, таких, як зграя дронів. Використання класичних методів, що дозволяють знаходити оптимальне рішення з використанням множинних ітерацій, може зажадати таких тимчасових і обчислювальних ресурсів, що приведуть до краху зграї дронів при несвоєчасному отриманні корекції маршруту.

Як видно з табл. 3.5 – табл. 3.6, запропонований метод синтезу маршрутів зграї БПЛА з розбиття на суб-рої, що діють в двовимірних просторових коридорах, дозволяє істотно прискорити виконання завдань обстеження ділянок територій. Описаний підхід забезпечує рішення задачі комівояжера з відвідуванням всіх вузлів координатної сітки, що покриває мапу частини досліджуваної поверхні, а також високий рівень узагальнення даних моделлю. Це дозволяє рекомендувати запропонований метод для використання на практиці.

Сформовані матриці подій дозволяють забезпечувати активність моніторингових або функціональних пристроїв БПЛА (відеокамери, метеодатчики, пристрої розпорощення речовин та ін.) лише у власному просторовому 2D-коридорі, а також і пасивність цих же пристроїв при попаданні деяких БПЛА суб-рою в чужій для нього просторовий коридор. Такий підхід підвищує час життєздатності зграї шляхом виключення дублювання задач у вузлах та економії обмежених енергетичних, обчислювальних та технологічних

ресурсів БПЛА.

Збільшення кількості БПЛА в кожному суб-рої або ущільнення вузлів координатної сітки прискорює виконання завдання цим суб-роєм, проте веде до значного витрачання загальних ресурсів зграї і до підвищення небезпеки зіткнень БПЛА всередині зграї. Таким чином, вибір характеристик зграї і планування завдань повинні бути спрямовані на пошук оптимального співвідношення K^2/N , що забезпечує прийнятний рівень енергоспоживання, матеріальних і часових витрат на виконання завдання на території.

Висновки до Розділу 3

1. Визначені способи обходу заданої території з розбиттям на окремі сегменти для кожного суб-рою в залежності від типу завдання ШГКМ. Типи завдання визначені в залежності від форми і розмірів території, а так само від розмірів видимої для сенсорів БПЛА області. Виконана класифікація топологій РММ на основі розосереджених БПЛА у двовимірному просторі.

2. Запропоновано метод визначення площі функціонування зграї БПЛА на основі прямокутника Брахмагупти з урахуванням зміни топології РММ, що надає можливість підвищити точність визначення необстеженої площі завдяки урахуванню більшої скупченості зграї ніж прямокутник Брахмагупти через необхідність забезпечення надійного обміну даними між БПЛА.

3. Здійснена модифікація методу розбиття гетерогенної зграї БПЛА на суб-рої з вирішенням задачі комівояжера (TSP) для кожного суб-рою окремо в обмежених просторових коридорах за рахунок реалізації алгоритмів плаского повороту на основі алгоритму Браччіні, що дозволило спростити планування руху зграї до 2D-рішень для суб-роїв з наступною конкатенацією у спільне 3D-рішення та тим самим дозволило на 11,6 % прискорити обстеження території суб-роєм з 6 БПЛА.

4. Запропоновано метод синтезу суб-оптимальних маршрутів суб-роїв БПЛА на базі нейронної мережі Хопфілда (НМХ) за рахунок використання бінарної моделі польотної карти, що дозволяє виключити дублювання виконання

завдання у будь-яких точках території та здійснювати «самозагоєння» рою у межах зграї дронів за рахунок перевизначення завдань підгруп як кібер-фізичної системи (КФС) у разі втрати кількох дронів під час критичного застосування.

5. Виконане 3D-модельювання групової поведінки дронів у складі гетерогенної зграї БПЛА, яка складається з різних моделей дронів, для відпрацювання алгоритмів запобігання зіткненням БПЛА та повернення дронів на власні бази (точки старту) для підзарядки акумуляторних батарей з наступним продовженням руху по своїй траєкторії. Створена просторово-часова візуалізація польоту.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОБМІНУ ДАНИМИ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ РУХОМОЇ МОНИТОРИНГОВОЇ МЕРЕЖІ

4.1 Забезпечення зв'язку у кіберфізичній системі з використанням рухомих пристроїв та хмарних сервісів

Питання мережевої взаємодії кіберфізичних об'єктів (КФО) та сумісності кіберфізичних систем (КФС) з глобальним Інтернетом є актуальним напрямком дослідження [111, 123]. У таких системах управління кількома фізичними (автономними або контрольованими) рухомими пристроями, здійснюється різними людьми – кібер-операторами (КО, англ. Cyber Operator або СО) через різні обчислювальні пристрої. При цьому топологія такої гетерогенної РММ постійно змінюється. Сьогодні найбільш недостатньо досліджені швидкодинамічні КФС, у яких КФО взаємодіють через протоколи бездротового зв'язку.

Mesh-топологія КФС, яка складається з рухомих об'єктів, що з'єднані бездротовими каналами зв'язку, передбачає неперіодичні зміни з'єднань між різними парами кіберфізичних компонентів. Такими парами у зазначеній КФС можуть бути [135]:

а) перший фізичний компонент (повітряний, наземний, підводний або надводний БПА, оснащений датчиками фізичних процесів) – другий фізичний компонент.

б) фізичний компонент – КО.

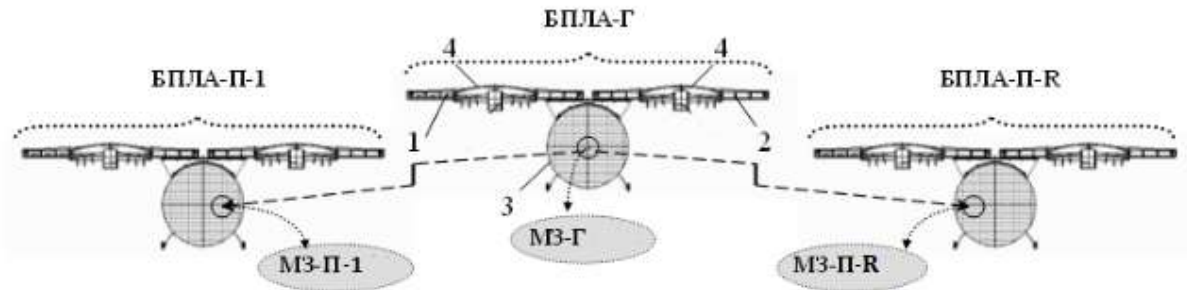
в) КО – КО.

г) перший КО – бездротова точка доступу (ТД) – другий КО.

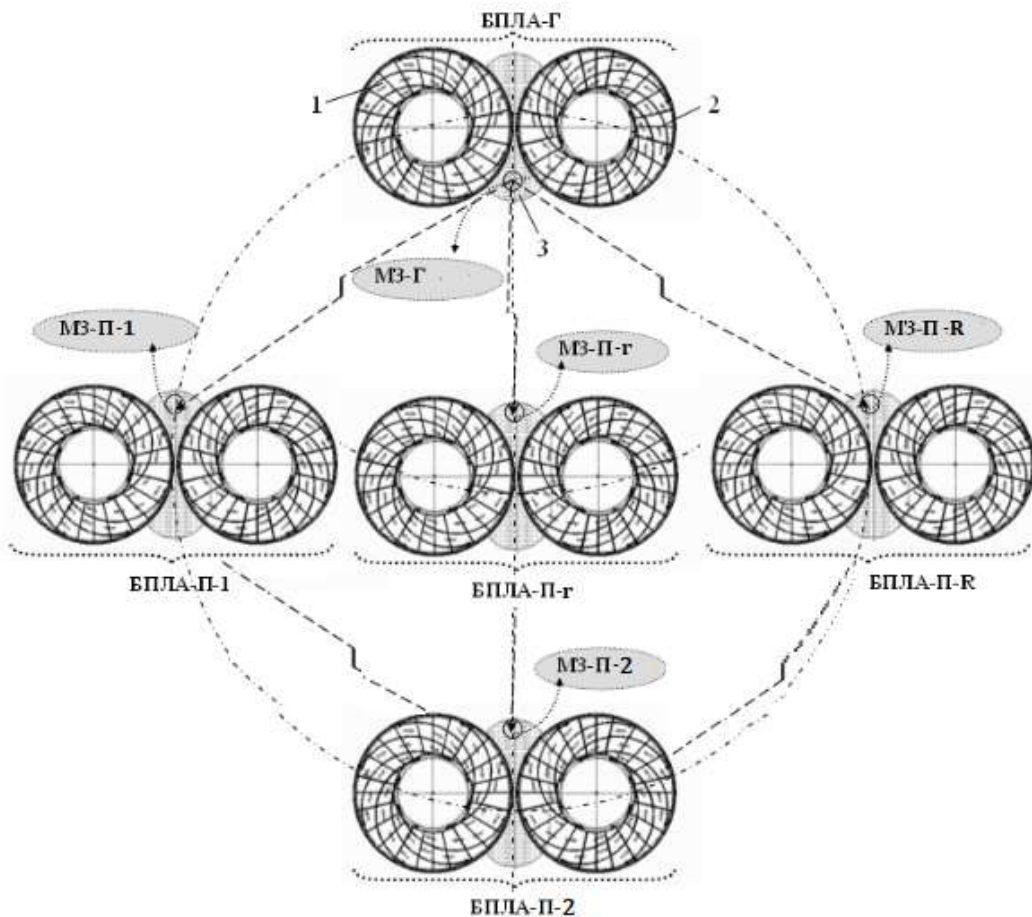
д) КО – ТД – телекомунікаційне обладнання – наземний ЦОД.

На рис. 4.1 показана ситуація, коли КФО – головний безпілотний апарат БПЛА-Г та R підлеглих безпілотних апаратів БПЛА-П-1 ... БПЛА-П-R роторного типу, які виступають одночасно вузлами топології комп'ютерної мережі – переміщуються за траєкторією, ініціюють передачу даних через відповідні

модулі зв'язку МЗ-Г та МЗ-П-1 ... МЗ-П-*R* та виконують роль трансферних вузлів для передачі інформації, отриманої від інших вузлів, які за низкою причин не мають можливості передати інформацію з власних датчиків до КО або ЦОД (КЦ).



а)



б)

Рисунок 4.1 – Траєкторія передачі та трансферу (ретрансляції) даних у комп'ютерній мережі з рухомими КФО: а – вид збоку; б – вид зверху

Таким чином, наприклад, вузол БПЛА-П-1 рухається та передає інформацію головному БПЛА-Г безпосередньо, а також іншому БПЛА-П-*R* через

вузол БПЛА-П-2, який використовується у якості трансферного, тому що прямий радіозв'язок між зазначеними підпорядкованими БПЛА неможливий через перекриття прямої електромагнітної видимості між ними вузлом БПЛА-П-г.

На рис. 4.1 цифрами позначені: 1, 2 – захисні або модернізуючі блоки БПЛА, 3 – корпус БПЛА з встановленими ЕОС, 4 – ротори (двигуни) БПЛА.

Найбільш багатоваріантними й завадовразливими, але такими, що дозволяють попереднє налагодження перед сеансом зв'язку, є напівдуплексні бездротові з'єднання [46].

Найчастіше у багаточисельних робочих (неголовних, підпорядкованих) БПЛА немає на борту модуля Wi-Fi. Тому, щоб забезпечити належну взаємодію між об'єктами КФС, необхідно детально розглянути питання вибору обчислювальної плати. Додаткові модулі мають бути встановлені таким чином, щоб створити канал зв'язку між неголовним та головним БПЛА та / або КО.

У той же час, радіомодуль мобільного пристрою, з яким працює КО, є вбудованим та не підлягає заміні в польових умовах. Таким пристроєм може бути смартфон, нетбук, ноутбук, пульт дистанційного управління тощо. Тому в такому разі треба вибирати вже не саму плату, а сумісні моделі пристроїв.

Слід розглядати взаємодію між такими парами бездротових пристроїв, які забезпечують телекомунікацію між БПЛА/БПЛА або БПЛА/КО, який керує БПЛА за допомогою будь-якого мобільного пристрою:

1) WiFi-адаптери БПЛА та мобільного пристрою, які працюють у режимі Ad-hoc («точка-точка»).

2) WiFi-адаптер (або WiFi-адаптер мобільного пристрою) та ТД, яка працює у режимі Infrastructure («Клієнт-Сервер»).

Необхідно також акцентувати увагу на такому очевидному нюансі, що під час організації взаємодії в будь-якій бездротовій КФС принцип «третьій зайвий» набуває суттєвого значення. Таким «третьім зайвим» є не тільки бездротові мережі через WiFi-канали, що перетинаються, але також звичні радіо-пристрої: USB-адаптер для радіо-мишки, бездротова клавіатура, Bluetooth-гарнітура і подібні. Всі вони можуть створити значні завади під час взаємодії об'єктів КФС.

В результаті через завади від підключення до ефіру нових КФО (які не входять до складу кіберфізичної системи – КФС, – але знаходяться у радіусі дії останньої) швидкість передачі інформації в гетерогенній мережі суттєво падає, хоча пропускна здатність каналів зв'язку між парою КФО залишається незмінною.

Найбільша кількість КФС на основі Wi-Fi при взаємодії WiFi-адаптерів БПЛА та мобільного пристрою використовують модифікації стандарту 802.11b/g/n. Природним бажанням власника КФС є використовувати найбільш новітній стандарт серед всіх доступних,

Безумовно, актуальними на сьогодні є версії стандарту 802.11n, 802.11ac та 802.11ax. Тим не менш, з аналізу використовуваних пристроїв встановлено, що навіть в однакових моделях мобільних пристроїв з однаковими апаратними модулями, дуже часто сумісність досягається лише на версіях стандарту 802.11b/g. В задачах передачі поодиноких дискретних сигналів від різних сенсорів з борту КФО, задля досягнення оптимального співвідношення ціна/якість, достатньо використання WiFi-модуля за стандартом 802.11g замість хоча й більш швидкісного, але також й більш енергоспоживного стандарту 802.11n.

У стандарті 802.11b/g не передбачений повнодуплексний режим роботи [211]. Тому, при організації напівдуплексної взаємодії між об'єктами КФС, необхідно приділити увагу як вибору моделей бездротових адаптерів (додаток А.3), так і налагоджуванню режимів роботи цих адаптерів на всіх об'єктах КФС.

За необхідністю організації більш швидкісної лінії зв'язку матиме сенс перехід на стандарт 802.11ac (підтриманий багатьма виробниками бездротових чипсетів – Quantenna, Broadcom, Buffalo, Cisco тощо), який, крім високої швидкості передачі даних, характеризується також й зменшеним у 6 разів енергоспоживанням порівняно з 802.11n.

Коли йдеться про взаємодію БПЛА і мобільних пристроїв, роль мережевої ТД виконує WiFi-адаптер БПЛА. Керуючий пристрій (смартфон, ноутбук, пульт дистанційного управління й т. п.) підключається до такої ТД [192, 194]. Іноді необхідно передавати ширококомовній трафік з БПЛА кільком кіберфізичним

компонентам – іншим БПЛА. У цьому випадку, кібер-оператор повинен підключитися до ТД, в якості якої виступає БПЛА, в режимі моста. Тоді стає можливим подальше поширення мережі, яка створена з БПЛА, до інших кіберфізичних компонентів [194]. В такому разі необхідно оцінювати зміни швидкості передачі даних від кількості ретрансляцій (рис. 4.2). При цьому час затримки при передачі даних зростає аж до повної втрати сигналу.

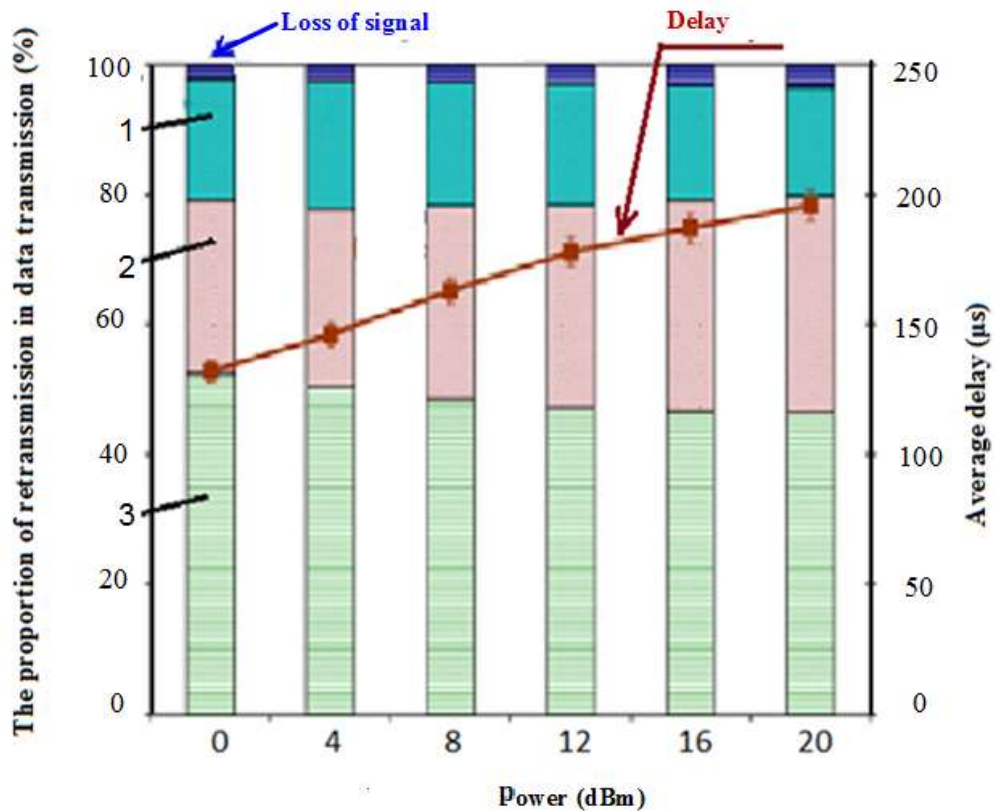


Рисунок 4.2 – Зростання затримки у часі передачі даних від кількості ретрансляцій:

- 1 – багаторазова ретрансляція;
- 2 – одноразова ретрансляція;
- 3 – без ретрансляцій

Зазвичай для виконання задач функціонування зграї БПЛА використовується рішення на основі декількох одиниць БПЛА в одному суб-рої, керованого з одного пульта, а також оператора, що здійснює управління апаратом. Такий підхід є ефективним для вирішення задач з високим рівнем

складності, але він вимагає багато ресурсів та постійної присутності людини за пультом управління, що є малоефективним при виконанні великої кількості відокремлених задач.

Більш ефективними є гетерогенні зграї, що об'єднують декілька різнофункціональних суб-роїв, які складаються з наземних, над-/підводних та літальних БПА різних типів, здатних виконувати спільними зусиллями єдине завдання, поставлене перед зграєю. При втраті працездатності GPS-модуля (в умовах великого електромагнітного опромінення у результаті застосування засобів радіоелектронної боротьби – створення «пухирів РЕБ») група БПА повинна перейти від централізованого управління до автономного режиму [333, 253, 256, 264].

Програмне забезпечення гетерогенної КС, яка виконує функції РММ, оперує трьома типами дронів (рис. 4.3).

Основні типи дронів на рис. 4.3 такі:

- а) Quadro – повітряний дрон;
- б) Machine – наземний дрон;
- в) Uterus – над-/підводний дрон.

Зважаючи на обмеженість ваги вантажу, який може піднімати БПА (в межах 30 % власної ваги), є сенс розділяти зграю БПА на суб-рої не за конструктивним типом, а за функціями (рис. 4.4):

1) суб-рій моніторингового призначення, БПЛА якого навантажені цифровими камерами покращених характеристик (до 12 Мпікс.), а на модуль пам'яті завантажені мапи моніторингової місцевості, фотознімки цільових об'єктів;

2) суб-рій транспортного призначення (суб-рій № 3), на борту БПА якого розміщений відповідний вантаж.

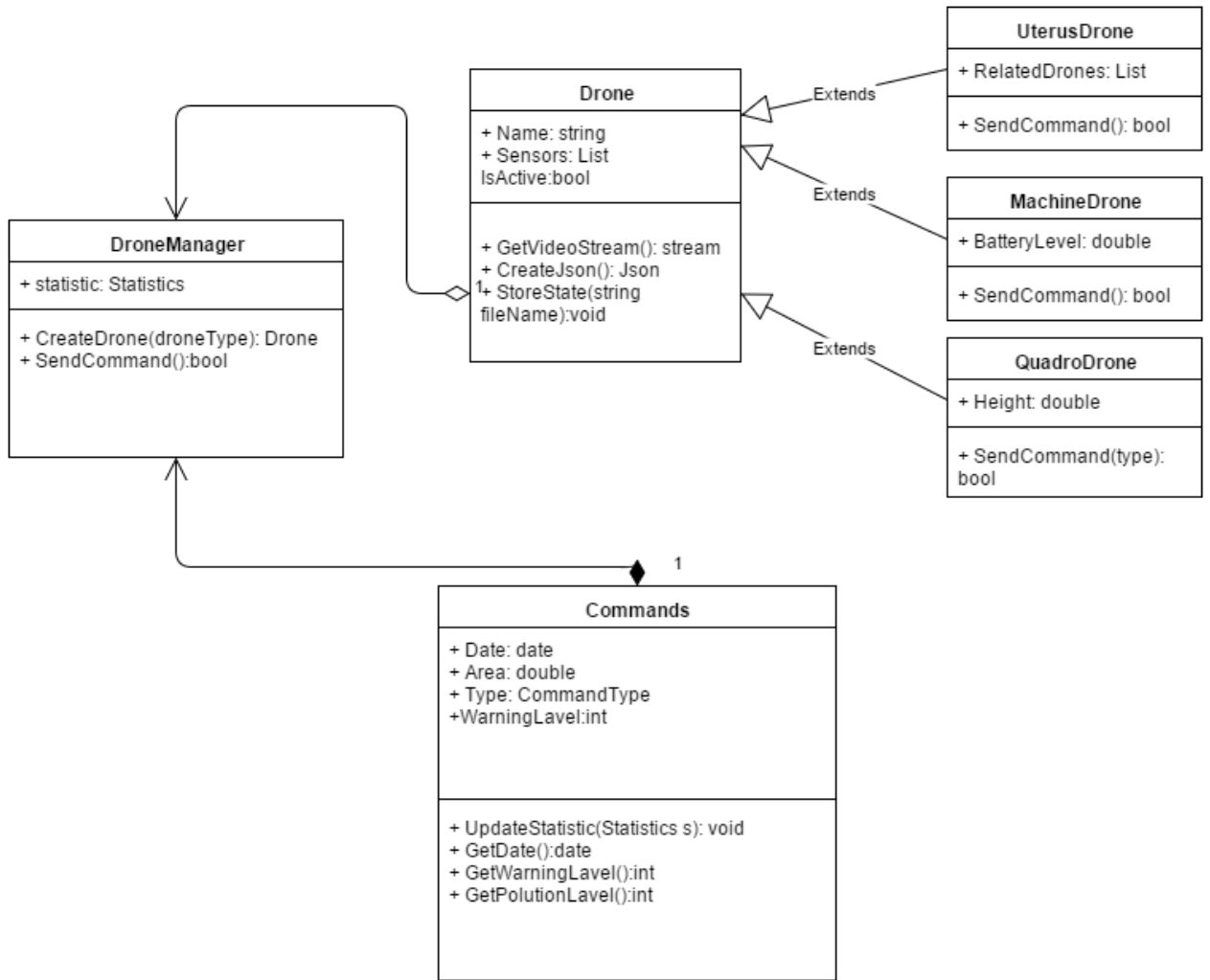


Рисунок 4.3 – UML-діаграма типів БПА (дронів)

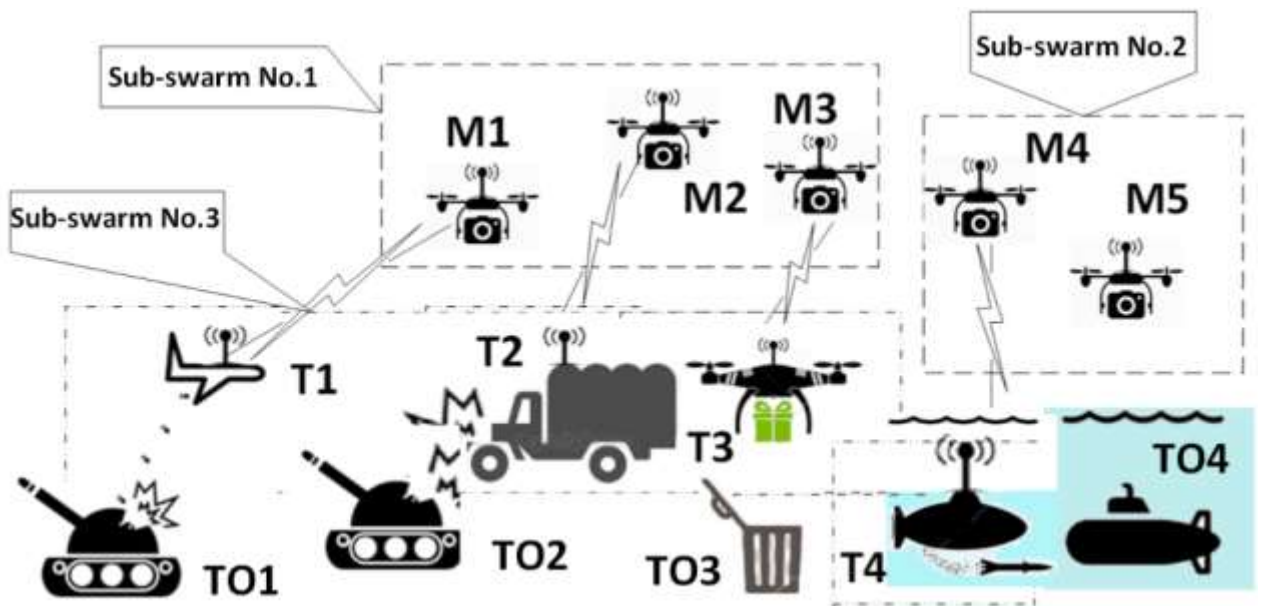


Рисунок 4.4 – Розбиття зграї БПА на суб-рої за функціями

Необхідно зазначити, що у складі зграї можуть бути один (нп., суб-рій № 3 – транспортний, для ураження цілей або доставки вантажів) або декілька суб-роїв із зазначеними функціями (нп., суб-рій № 1 – моніторинговий для взаємодії з повітряними та наземними транспортними БПА; суб-рій № 2 – моніторинговий для взаємодії з над-/підводними БПА).

При такому розподілі функцій між суб-роями, навіть при відсутності зв'язку з КЦ та можливістю визначити GPS-координати у «РЕБ-пухирях», БПЛА суб-роїв № 1 та № 2 завантажують з модуля пам'яті в обчислювач частину мапи місцевості з останніми визначеними GPS-координатами. Потім, за допомогою бортових систем стереозору, на відокремленому сегменті завантаженої мапи здійснюється пошук цільового об'єкта за даними, отриманими з сенсорів [26, 31, 241, 75]. Програмне забезпечення дрона створює тривимірну карту оточення, тому дрон може літати навіть за відсутності зв'язку з супутниками та визначати перешкоди на відстані до 30 м.

Передача інформації між БПА зграї може здійснюватися через радіоканал з переключенням між частотами (нп., 2,4 и 5,8 ГГц), якщо на одній з них виникають завади. Якщо радіозв'язок зовсім неможливий у «РЕБ-пухирях», тоді квадрокоптер моніторингового суб-рою «зависає» над знайденою ціллю, і дрон транспортного суб-рою може знайти його за допомогою власної системи стереозору.

Особливості функціонування розбитої на суб-рої зграї БПЛА з урахуванням показників бортових датчиків та можливостей вбудованої системи комп'ютерного зору повинні розглядатись більш детально. Так, наприклад, при використанні у складі зграї БПЛА типу DJI Phantom 4 Pro необхідно враховувати, що дані надходять з таких пристроїв фронтального, заднього та нижнього стереозору [54]:

– цифрова камера з дюймовою CMOS-матрицею, що здатна знімати фото до 60 кадрів на секунду з 20-мегапіксельній якістю, у т. ч. в умовах низького (біля 15 люкс) та високого рівня яскравості (сонячне небо і темна земля під ним) на швидкості до 50 км/год;

- спарені датчики відео-системи на фронтальній поверхні корпусу;
- спарені датчики відео-системи на задній поверхні корпусу;
- спарені датчики відео-системи на нижній частині корпусу.

Розмір частини мапи місцевості повинен бути відповідним до обмежених обчислювальних можливостей одноплатного бортового комп'ютера БПЛА. Тому при відсутності цільового об'єкта на завантаженій частині мапи, в обчислювач БПЛА завантажується наступний фрагмент сусідньої частини мапи.

БПА у складі суб-рою транспортного призначення за допомогою бортових відеосистем отримують інформацію від БПЛА моніторингового суб-рою щодо взаємного місцезнаходження (відстані) з цільовими об'єктами (Ц1–Ц3 на рис. 4.4).

Якщо метою транспортного БПА є не ураження цілі, а доставка вантажу, то на такому БПА повинен бути реалізованим алгоритм або автоматичного скидання посилки, або за ідентифікацією адресату. При помилковій ідентифікації БПА транспортного призначення може бути запрограмованим на знищення вантажу або ураження хибного адресата.

При розробленні зазначеної КС враховані такі характеристики для кожної окремої моделі БПЛА [279]:

- виробник;
- максимальна злітна маса, кг (від 10 до 85);
- маса корисного навантаження, кг (від 2 до 25);
- максимальна швидкість, км/год (від 70 до 200);
- льотна межа («стеля»), км (від 0,5 до 4,0);
- дальність дії, км (від 3 до 500);
- тривалість польоту, годин (від 0,3 до 9,0).

Приклад сценарію використання КС для збору поодиноких потокових даних наведено на рис. 4.5.

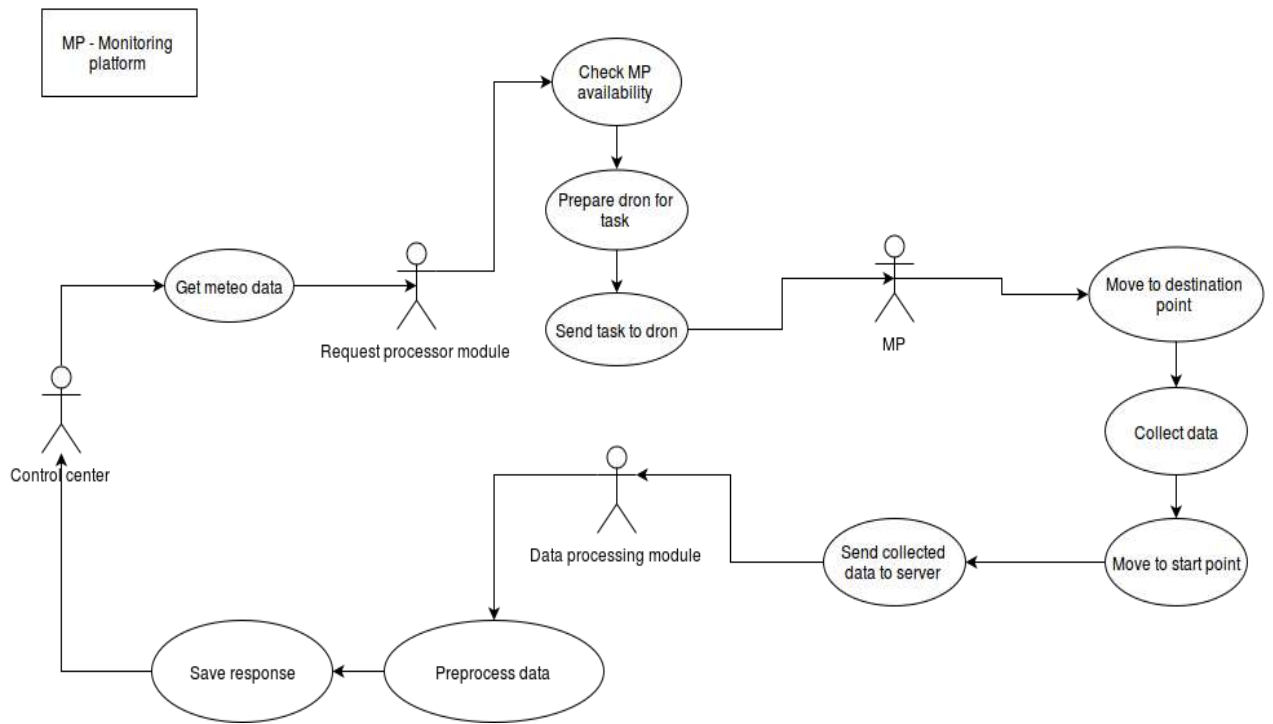


Рисунок 4.5 – Приклад сценарію роботи КС на основі БПА

У складі ПЗ, що забезпечує функціонування мереж БПА, заснованою на використанні мобільних пристроїв, передбачається функціонування таких модулів:

- програмний модуль зв'язку;
- програмний модуль управління;
- модуль обробки даних;
- клієнтський API;
- модуль зберігання та резервування даних.

При формуванні гетерогенної зграї з різних за конструкцією та функціями БПА, клієнтські застосунки (Client Applications) рухомих абонентів мережі можуть бути виконані на будь-якій сучасній мобільній платформі (Windows Phone/Mobile, iOS, Android тощо) [255, 257].

Створення програмно-апаратної КС на основі БПЛА можливо з виконанням мобільного аналізу даних та використанням кросплатформного хмарного сервісу Google Firebase.

На теперішній час накопичений немалий зарубіжний та вітчизняний досвід

контролю за поодинокими БПЛА та зграями БПЛА з використанням інтегрованого підходу, за яким контроль здійснюється з використанням наземних та повітряних трансферних вузлів [135, 398, 190]. Сучасні КС на основі БПЛА використовують для цього координати БПЛА, отримані від вбудованих в останні GPS-модулів. Але за 1 хв польоту похибка маршруту БПЛА, скоординованого за даними GPS-модуля, може становити до 50 м [398]. Проблемні питання точного досягнення кінцевої точки маршруту БПЛА під час використання сучасних супутникових технологій визначення координат повністю не вирішені [375].

Слід зауважити, що причинами виникнення неточних вимірів GPS-координат можуть бути:

1) штучне обмеження точності визначення координат цивільними GPS-навігаторами у межах 2–20 метрів [303, 339].

2) хибна геометрія супутників. Виникає тоді, коли всі прийняті супутники згруповані близько один до другого, чи вибудовані в лінію щодо положення приймача, що у свою чергу не забезпечує необхідну розбивку сигналу на так званий трикутник, від чого точність обчислення координат стає менш надійною. Таке непередбачуване зміщення положення супутників на орбіті відбувається через різні збурюючі фактори та приводять до похибок 0,6–10 м [355].

3) відбивання сигналу від високих будинків чи інших перешкод перед тим, як досягти GPS-приймача. Тим самим або збільшується відстань сигналу, або сигнал втрачається.

Зумовлене збільшення відстані слід враховувати при розрахунках часу польоту з огляду на те, що сучасні міні-БПЛА живляться від акумуляторів на борту, ємність яких забезпечує тривалість польоту від 7 до 28 хв [15]. Отже, можна зробити висновок, що для забезпечення якості виконання завдання необхідно здійснювати додаткове управління польотом БПЛА з коригуванням маршруту останнього до точки цілі. Поширеним підходом до вирішення питань такого управління є використання бездротових сигналів від мобільних пристроїв.

Метод гарантованої доставки даних між БПЛА може бути розвиненим за допомогою використання мобільних пристроїв, які здійснюють мобільний аналіз

даних з БПЛА та з оточуючого середовища, що базується на використанні сервісу Google Firebase як бази даних реального часу (БДРЧ), засобу авторизації Клієнтів та Об'єктів системи контролю БПЛА, засобу синхронізації даних [379]. Зазначений безкоштовний хмарний сервіс є універсальною платформою для побудування Android- та iOS- мобільних застосунків. Перевагою саме цього сервісу є стабільна робота навіть при збоях Інтернет-зв'язку. Слід зауважити, що при використанні Клієнтів з різних платформ необхідно зареєструвати два облікових записи в Google (окремо для Android та для iOS).

На рис. 4.6 наведені можливі взаємозв'язки між Клієнтами та Об'єктами розробленої КС з використанням мобільних пристроїв та відстроченою синхронізацією інформації між БПЛА.

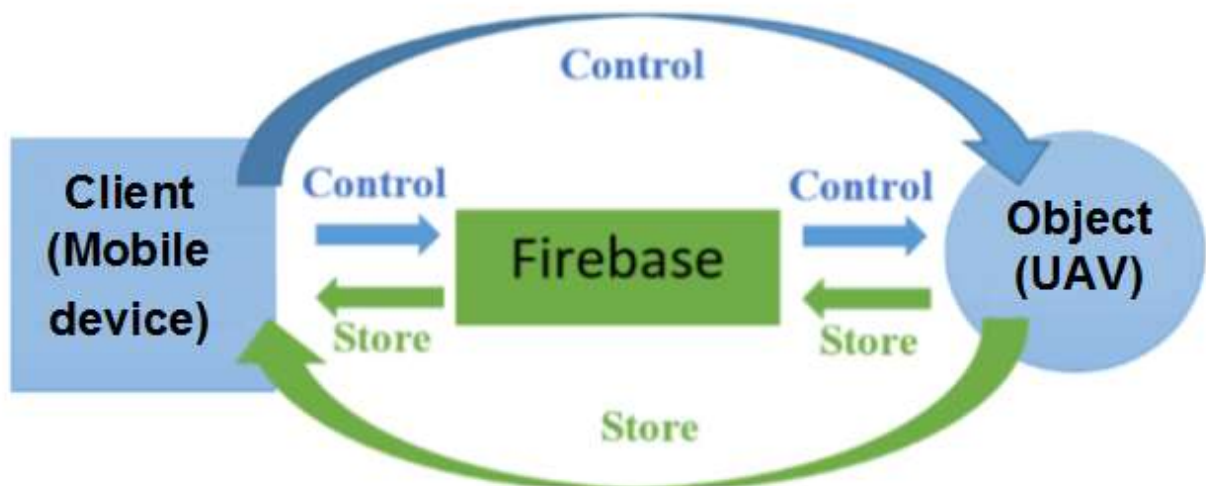


Рисунок 4.6 – Взаємодія мобільного пристрою з БПЛА через сервіс Google Firebase

У Firebase SDK сервер має вбудований метод для створення користувацьких ідентифікаторів. Firebase створює відповідний унікальний ідентифікатор (рис. 4.7), який ідентифікує пристрої у мережі і надає певний доступ до ресурсів, а саме до бази даних у реальному часі Firebase Storage. Тобто, маємо ідентифікатор Об'єкта, за допомогою якого він ініціалізується Клієнтом [336, 254].

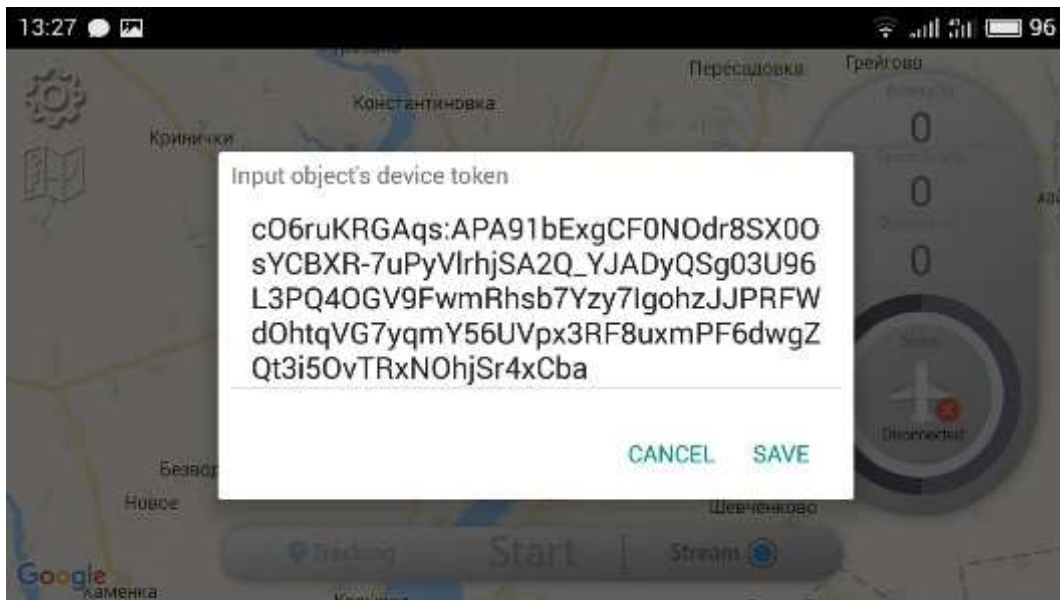


Рисунок 4.7 – Ідентифікатор Об’єкта в налаштуваннях Клієнта

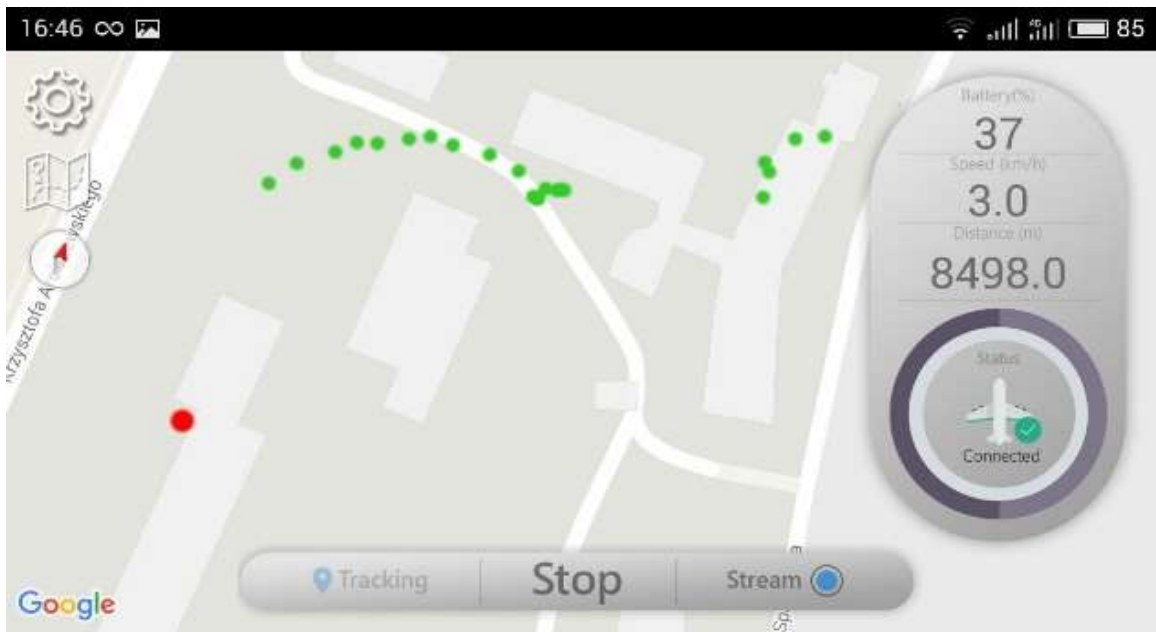
На доступній хмарі Google Firebase реалізована структура збору даних щодо подій у розрізі користувачів (Клієнтів та Об’єктів), які пройшли авторизацію в названій хмарі.

Сегменти користувачів (так звані «аудиторії») розподіляються як за попередньо налагодженими параметрами (зона знаходження, технічні дані платформ БПЛА/мобільний пристрій тощо), так і за даними про події.

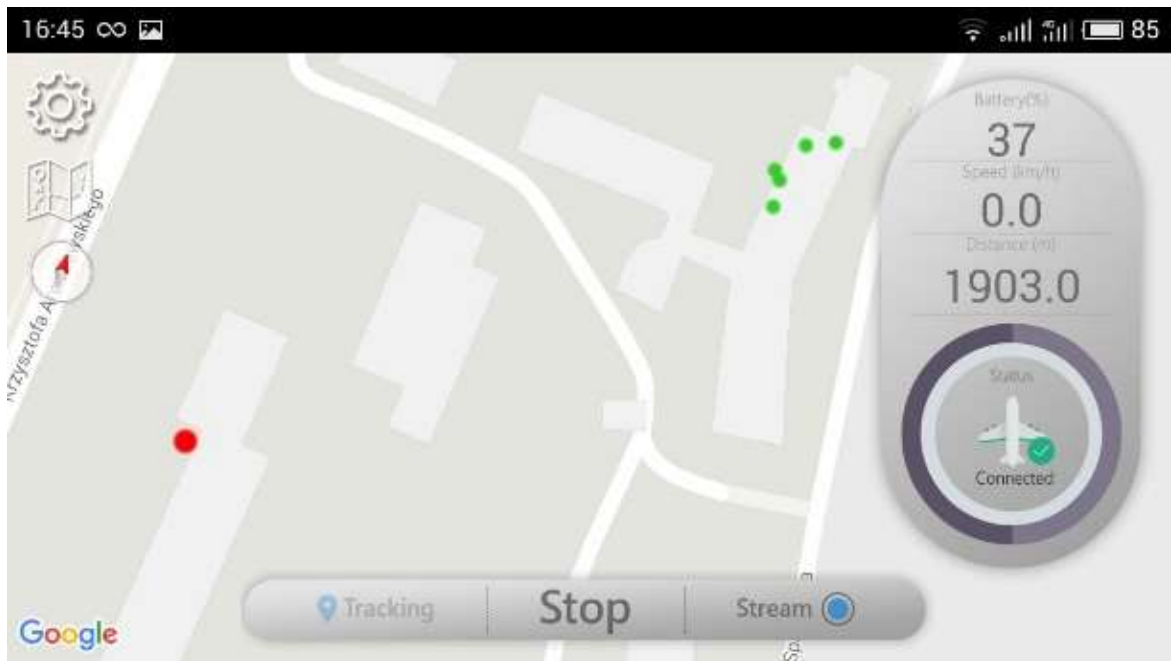
Наприклад, на рис. 4.8, а наведена «аудиторія», створена на Google Firebase, яка складається з мобільного пристрою (Клієнт, зображений окремою великою крапкою) та двох керованих БПЛА (об’єктів, переміщення яких зображене двома низками менших крапок). Зазначена «аудиторія» сформована за географічним принципом знаходження в одному квадраті місцевості.

На рис. 4.8, б наведена «аудиторія», сформована за ознаками платформи (Android).

Таким чином, унікальний рядок символів може бути переданим іншим членам «аудиторії» або через SMS-сервіс, або іншими соціальними мережами (коли відсутня можливість користування сервером). Після цього клієнт встановлює з’єднання з об’єктом и отримує доступ до ресурсів Firebase, де надається можливість зберігати дані об’єкта у реальному часі.



а)



б)

Рисунок 4.8 – «Аудиторія» Google Firebase, сформована за географічним принципом (а) та за принципом платформи (б)

Після авторизації в Google Firebase, Об'єкт (БПЛА) кожні 5 секунд відправляє свої дані місцезнаходження Клієнтові своєї «аудиторії». При цьому не має значення наявність або відсутність безпосереднього зв'язку між Клієнтом та Об'єктом (Об'єктами), кого контролює цей Клієнт – засоби мобільного аналізу даних Google Firebase забезпечать передачі коригуючих команд саме

необхідному Об'єкту, у т. ч. з відстроченою синхронізацією.

З правого боку екрана Клієнта розташований індикатор поточного заряду акумулятора Об'єкта (у відсотках), швидкість Об'єкта (км/год) та дистанція між Клієнтом та Об'єктом (в метрах).

У запропонованій КС на основі мережі БПЛА відтворений розроблений протокол взаємодії між Клієнтом та кожним з Об'єктів з врахуванням показників цілого набору пристроїв на борту БПЛА: акселерометра, барометра, гіроскопів, магнітографа, GPS-модуля, GSM-модуля тощо.

За результатами мобільного аналізу сукупності наведених показників Клієнтом може бути змінений, наприклад, координати фінішу Об'єкта – широта і довгота (Latitude and Longitude). Діаграма класів для програмної реалізації зазначеного завдання наведена на рис. 4.9.

Приклад оформлення протоколу взаємодії GPS-модуля Об'єкта з Клієнтом наведений на рис. 4.10, деталізація параметрів протоколу представлена у табл. 4.1.

```
>$GPRMC,170840.00,A,5445.33016,N,1704.38950,E,1.6198,,310317,,A
*7D
```

Рисунок 4.10 – Нотація протоколу взаємодії Клієнта з Об'єктом при зміні координат фінішу БПЛА

Коли Об'єкт прибув до цілі, на екрані Клієнта з'являється відповідне повідомлення (рис. 4.11).

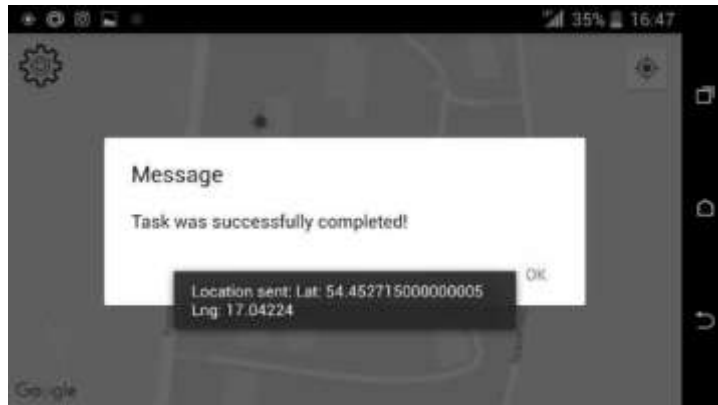


Рисунок 4.11 – Повідомлення на екрані Клієнта після виконання завдання керованим БПЛА

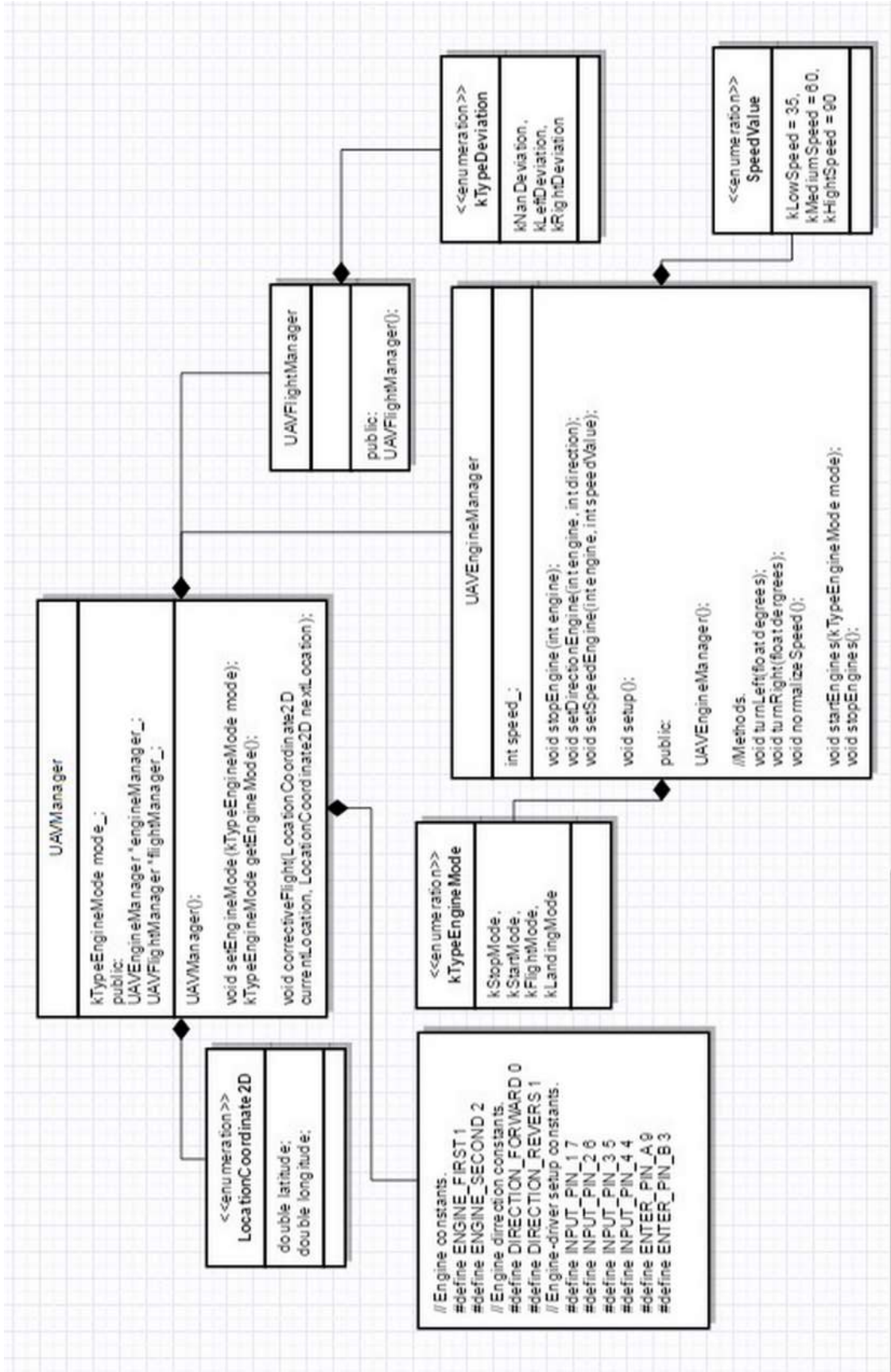


Рисунок 4.9 – UML-діаграма класів зміни координат фінішу при управлінні БПЛА

Таблиця 4.1 – Деталізація параметрів протоколу взаємодії Клієнта з Об'єктом при управлінні БПЛА зі зміною GPS-координат фінішу

170840.00	Час UTC: 17 год 08 хв 40,00 с
A	Статус достовірності: A – достовірні дані, V – недостовірні дані
5445.33016	Широта: 54 град. 45,33016 хв
N	N – північ, S – південь
1704.38950	Довгота: 17 град. 04,38950 хв https://data.aad.gov.au/aadc/calc/decimal_dms.cfm
E	E – схід, W – захід
1.6198	Горизонтальна швидкість, вузлів/год (відповідає 3 км/год на рис. 4.18, а)
–	Напрямок курсу відносно півночі (градуси)
310317	Дата: 31 березня 2017 р.
–	Магнітне відхилення (градуси)
–	Напрямок відхилення: E – східний, W – західний
A	Режим: A – автономний, D – диференціальний, E – апроксимація, N – недостовірні дані
*7D	Контрольна сума

Із співставлення координат широти та довготи рис. 4.10, табл. 4.1 та рис. 4.11 можна побачити, що наявне відхилення між заданими системою

управління координатами та координатами фінішу після виконання завдання. Таке відхилення є наслідком неідеальної роботи GPS-модуля БПЛА, в результаті чого відстань рахується з похибками.

Найчастіше програмні застосунки за клієнт-серверною структурою розробляються таким чином, що серверна частина розташована на наземному КЦ або на планшеті (ноутбуку й т. п.) кібер-оператора, а мобільний застосунок, виконуючий реєстрацію заданих подій/параметрів, працює на пересувних/рухомих об'єктах (мобільних пристроях, WiFi-камерах, дронах, тощо) з обмеженими обчислювальними можливостями. Необхідно зауважити, що використання даних у хмарних сховищах вимагає спеціальних заходів для захисту такої інформації [76, 276, 222].

Таким чином, інформаційна підсистема КФС реєстрації подій/параметрів надає власникові інформацію щодо їх кількості у розрізі за кожним встановленим реєстратором, інтенсивність потоків подій/вимірювань у визначений час, градації параметрів за значенням та ін. За допомогою інтерфейсу можливо авторизуватись в системі під звичайним користувачем та переглянути дані, але змінити їх може тільки особа, яка є у затверженому списку доступу.

4.2 Розроблення засобів обліку великорозмірних об'єктів за допомогою рухомих моніторингових мереж

На теперішній час в світі є потреба визначати кількість великих вантажів під час їх руху/завантаження/розвантаження на тимчасових пунктах пропуску, для розрахунку вартості перевезення через міста та мостові споруди, тощо.

В світі використовуються декілька систем на базі GPS-трекерів та відеокамер з сервером розпізнавання образів вантажу, його номеру, та запису даних по номеру контейнера в базу даних. Найбільш відомими з таких систем для вантажообліку є Тетіс (Трітон), Helios, Контейнер – КОНТРОЛЬ та ін. [228, 319], які або зчитують інформацію з бортового контролеру на вантажі, або є стаціонарно встановленими у транспортних вузлах. Такі системи є надмірно складними технологічно й надають інформацію лише власникові вантажу або

компанії-перевізнику. Але іноді зазначена інформація необхідна саме на місті проходження вантажу. Крім того, всі зазначені системи використовують для реєстрації GPS-координати вантажів й тому втрачають працездатність при відсутності зв'язку з супутниками.

Для обробки зображень рухомих об'єктів використовуються різноманітні методи, що відмінні за параметрами і вихідними результатами. Це лінійні та нелінійні фільтри, фільтр Гауса, медіанні, ранжуючі, адаптовані, гібридні та ін. фільтри, здатні коригувати розмитість зображення, зумовлену саме рухом досліджуваного об'єкта [247].

Виявлення на кадрі певного об'єкту можна поділити на наступні етапи:

- знаходження градієнту зображення, тобто контурів зображення, нп., за допомогою алгоритму Собеля [204];
- побудова гістограми зображення;
- бінаризація;
- знаходження пікселів, які входять в певний діапазон значень;
- знаходження координат об'єкту.

Правильно побудований алгоритм дасть можливість опустити деякі етапи, такі, як бінаризація, а побудову гістограми і знаходження контурів об'єднати.

Збільшити швидкість прийняття рішення щодо наявності великорозмірного вантажу у кадрі та забезпечити високоякісну фільтрація без додаткових спотворень дозволяє застосування подвійного медіанного фільтра [134].

4.2.1 Розроблення методу обліку великорозмірних об'єктів із запобіганням реєстрації сторонніх об'єктів та подвійної реєстрації

При дослідженні процесу побудови та функціонування РММ слід враховувати, що об'єкти моніторингу можуть бути не стаціонарними, а рухомими. Більш того, рухатись може не тільки сам вантаж, а й засіб його реєстрації (нп., дрон з відеокамерою), треба докласти певних зусиль для запобігання реєстрації замість великого вантажу – стороннього об'єкта, що

попадає у кадр.

Задача виявлення рухомих великих об'єктів на відео-поточці при практичному підході розбивається на декілька менших підзадач: виявлення на кадрі потрібного об'єкту (автомашини, контейнера, тощо), співставлення пари кадрів і порівняння положень об'єкту на них.

Розрахуємо градієнт зображення. Градієнт у загальному випадку – векторна величина, що показує напрям максимального збільшення деякої величини. В нашому випадку «деяка величина» – двовірна функція яскравості зображення I . Яскравість зображення в пікселі PG_{ij} це значення пікселя в градаціях сірого (Grayscale). Розрахунок значення в градаціях сірого можна провести за допомогою формули (4.1):

$$I_{ij} = 0,2125r + 0,7154g + 0,00721b, \quad (4.1)$$

де r – значення червоного каналу (Red channel);

g – значення зеленого каналу (Green channel);

b – значення синього каналу (Blue channel).

Вектор градієнту зображення для функції яскравості I матиме наступний вигляд:

$$\bar{g} = \text{grad}(I) = (dI/dx; dI/dy), \quad (4.2)$$

Для знаходження градієнту зображення були використані фільтри Собеля. Фільтри Собеля – двовірні вектори-маски розмірністю 3×3 , якими початкове зображення обробляється в наступному порядку:

$$\begin{aligned} dx &= (p7 + 2p8 + p9) - (p1 + 2p2 + p3); \\ dy &= (p3 + 2p6 + p9) - (p1 + 2p4 + p7), \end{aligned} \quad (4.3)$$

Таким чином, маємо значення похідних по двом напрямкам у зображенні: по осі x та осі y . Безпосередньо значення градієнту в точці можна розрахувати за

допомогою наступної формули:

$$G = \sqrt{dx^2 + dy^2}. \quad (4.4)$$

Розглянемо побудування гистограми – графіку частотного розподілення елементів цифрового зображення з різною яскравістю, в якому по горизонталі представлена яскравість (значення функції I , яка була розглянута раніше), а по вертикалі – значення пікселів з даним значенням яскравості (рис. 4.12).

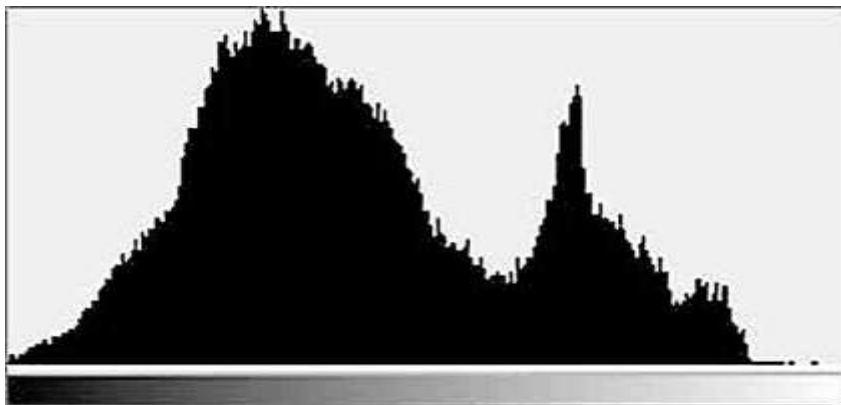


Рисунок 4.12 – Типова гистограма яскравості [146]

Алгоритм розрахування гистограми:

1. Подаємо зображення A ($W \times H$) в градаціях сірого, використавши для кожного пікселя формулу (4.4);
2. Обрахуємо значення A_{min} та A_{max} ;
3. Проаналізуємо зображення по осям x та y для гистограми розміром N , де $N = A_{min} - A_{max} + 1$, та для кожного елемента зі значенням A_{ij} ($i = 1 \dots W, j = 1 \dots H$) додаємо «1».

Процес подання гистограми в розробленому алгоритмі описаний нижче.

Процес бінаризації – це процес перетворення зображення з кольорового чи в градаціях сірого в чорно-біле (бінарне). Як правило, коли говорять про бінаризацію, мають на увазі порогову бінаризацію. Принцип функціонування порогової бінаризації наступний: зображення подається в градаціях сірого, після чого кожне значення пікселя порівнюється з пороговим значенням (воно може

бути як константою, так і значенням, вирахуванням за допомогою певного методу, наприклад, методу Оцу). Якщо значення в градаціях сірого пікселя менше порогового значення, на місце пікселя записується «1» ($r: 255, g: 255, b: 255$). Інакше – «0» ($r: 0, g: 0, b: 0$). Після чого маємо зображення, яке складається лише з білого та чорного кольорів. В розробленому алгоритмі цей етап опущено.

Потім знаходимо пікселі, що входять в деякий діапазон. Після знаходження градієнту зображення отримаємо повноцінну картину всіх контурів всіх об'єктів на зображенні. Для пошуку контурів потрібного об'єкту використовуємо градієнт зображення, найбільші значення котрого знаходяться на межах об'єкту, який контрастує з оточенням більше всього. В нашому випадку великорозмірний вантаж є саме таким об'єктом.

Для того, щоб віднайти на мапі градієнту контури потрібного об'єкту, знайдемо на гістограмі пікселі, які входять в діапазон, рівний в розглянутому випадку $\delta = 3\%$. Значення у 3% не є константою, а визначається у кожному пункті обліку в залежності від розміщення мобільного реєстратора по відношенню до рухомого вантажу. Значення гіперпараметру δ добирається таким чином, щоб на факт реєстрації не впливали сторонні перешкоди, нп., великорозмірні об'єкти поза межами зони огляду при завищених значеннях δ (рис. 4.13, а). При занижених значеннях δ , навпаки, може бути незархований сам великорозмірний об'єкт (рис. 4.13, б).

Таким чином, всі пікселі, концентрація який в гістограмі менша за δ від абсолютної кількості пікселів (тобто, від розміру гістограми), будемо вважати пікселями, що знаходяться на контурі об'єкту, який повинен бути зареєстрованим.

Координати об'єкту знаходяться наступним чином: зміні підлягають чотири значення – координати верхнього лівого кута прямокутника, в який вписаний об'єкт, та координати нижнього правого кута. Ітеративно знаходяться потрібні пікселі, а їх координати записуються в змінні. Після проходження по зображенню матимемо координати прямокутника, в межах якого знаходиться об'єкт.



Рисунок 4.13 – Невдалий вибір значення δ : завелике (а) та замале (б)

Реалізація розробленого алгоритму складається з трьох кроків: завантаження зображення в градаціях сірого (використовується бібліотека OpenCV); складання гістограми зображення (з відмінністю в тому, що на вертикальній осі розташовуються значення градієнту в точках, а не яскравості); знаходження координат пікселів, значення градієнту яких знаходиться в межах дібраного значення δ . Блок-схема алгоритму реєстрації великорозмірного вантажу наведена на рис. 4.14.

Спочатку підключаються стандартні бібліотеки та основні файли бібліотеки OpenCV.

Після отримання зображення розміром $W \times H$ допоміжна функція повертає значення градієнта пікселя PG_{ij} методом Собеля.

Далі головна функція, яка реалізовує алгоритм, описаний вище, повертає тип *std::tuple*, елементами якого є координати прямокутника, в який вписано об'єкт. Якщо рухомий об'єкт не відноситься до великорозмірних та його зображення-прямокутник не задовольняє умовам алгоритму (його площа займає менше 15 % площі зображення), повертається кортеж з чотирьох значень «мінус 1».

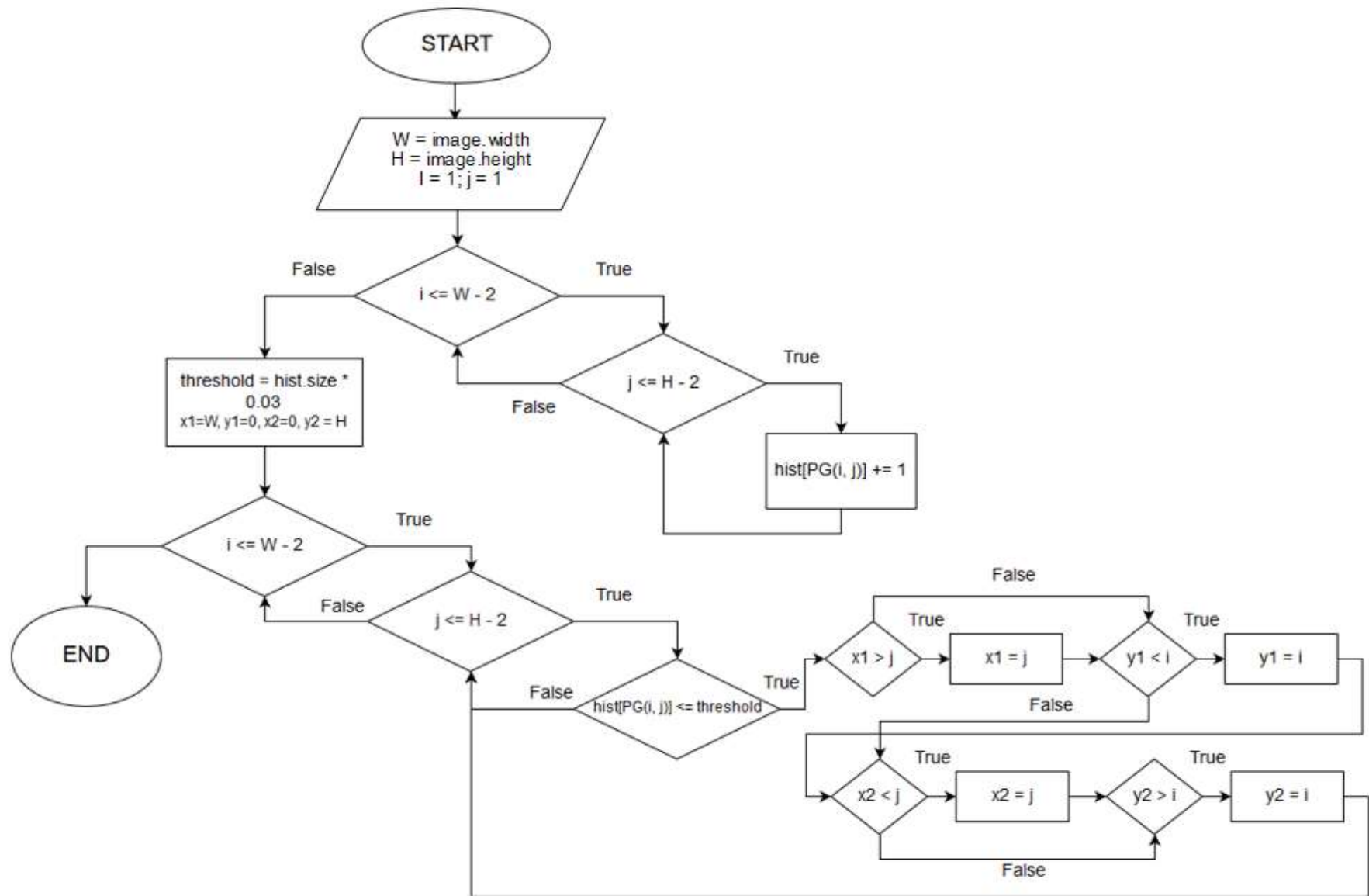


Рисунок 4.14 – Блок-схема алгоритму запобігання подвійної реєстрації

Потім відбувається формування гистограми. Вона являє собою об'єкт *std::map* (асоціативний масив), в якому ключом є градієнт, а значенням – кількість пікселів з таким градієнтом. Спочатку значення кількості пікселів з даним значенням градієнту в гистограмі рівне нулю. Ітеративно, $i = 1 \dots W-2$, $j = 1 \dots H-2$, елементи горизонтальної осі гистограми інкрементуються, і на виході буде отримана гистограма, яка представлена асоціативним масивом.

В циклі для кожного пікселя зображення *A* розраховується значення градієнту, яке слугує ключом для гистограми – для отримання «насиченості» пікселів і порівняння його з порогом, який був зазначений раніше. Той піксель, насиченість якого менша за величину δN (де N – кількість унікальних значень градієнту), вважаємо за піксель, що знаходиться на контурі об'єкту. В такому разі значення координат прямокутника об'єкту перераховується.

На останньому кроці здійснюється перевірка отриманих даних і повернення результату. Перевірка відбувається за наступним принципом: якщо відношення площі прямокутника, в який вписано об'єкт, до площі зображення менше за 0,15 (15 %), то вважається, що об'єкту на зображенні немає (або об'єкт, що має такі розміри, що не дозволяють його класифікувати як великорозмірний вантаж – це можуть бути, наприклад, літаки, що пролітають над реєстратором).

Після порівняння координат об'єкту на двох сусідніх кадрах приймається рішення, чи є об'єкт рухомим для запобігання подвійної реєстрації нерухомих об'єктів. Проведено тестування програми на запобігання реєстрації об'єктів, що не рухаються (будинки, авто на стоянці тощо). Для перевірки обрані два зображення розміром 240×200 (рис. 4.15).

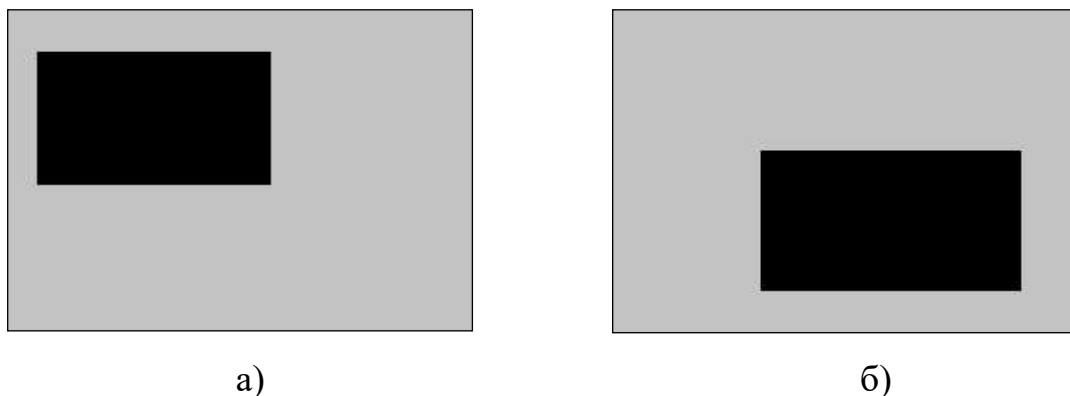


Рисунок 4.15 – Положення вантажу: *frame1* (а) та *frame2* (б)

При тестуванні КС на коректність при зміні положення вантажу, коли два кадри є різними з точки зору руху об'єкту (*frame1* та *frame2*), системою приймається рішення «*Object moves*».

Якщо замінити *frame1* та *frame2* одним зображенням *frame1*, КС прийме рішення про нерухомість або відсутність об'єкту: «*Object doesn't move*». Таким чином запобігається подвійна реєстрація об'єктів, що не рухаються.

Також проведено тестування швидкодії роботи програми для вантажів різного розміру, що надають на світлочутливій матриці реєстратора зображення різної розмірності у пікселях (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Тестування швидкодії клієнтської частини

Розмірність $W \times H$, пікс.	Швидкість виконання, мс
240 × 200	53
400 × 400	156
560 × 560	710
800 × 800	2099
1000 × 1000	5202
1250 × 1250	7953

4.2.2 Виключення впливу руху реєстратора на результати обліку великорозмірних об'єктів

Для того, щоб фіксація руху предметів перед камерою реєстратора була адекватною та об'єктивною, потрібно виключити вплив руху самого пристрою-реєстратора у складі РММ.

Таким реєстраторами можуть виступати мобільні пристрої навіть уживані Android-пристрої бюджетної комплектації, оскільки вони мають акселерометр. Це підтверджується наявністю у них можливості перевертання екрана при повороті пристрою, тому акселерометр є достатнім точним та чутливим сенсором,

потрібним для встановлення режиму «У русі» для мобільного пристрою.

Такі мобільні пристрої можуть бути або закріплені безпосередньо на БПЛА, або рознесені за допомогою БПЛА по пунктах обліку. В будь-якому разі буде створена РММ (рис. 4.16).

Необхідно дослідити архітектуру та процес побудови такої локальної мережі, розгорнутої, наприклад, на основі технології Wi-Fi. В такій мережі КО (Note1 на рис. 4.16) через ТД (AP1 на рис. 4.16) повинен приймати дані по від великої кількості пристроїв-реєстраторів (Bay1-M1... Bay1-Mn на рис. 4.16).

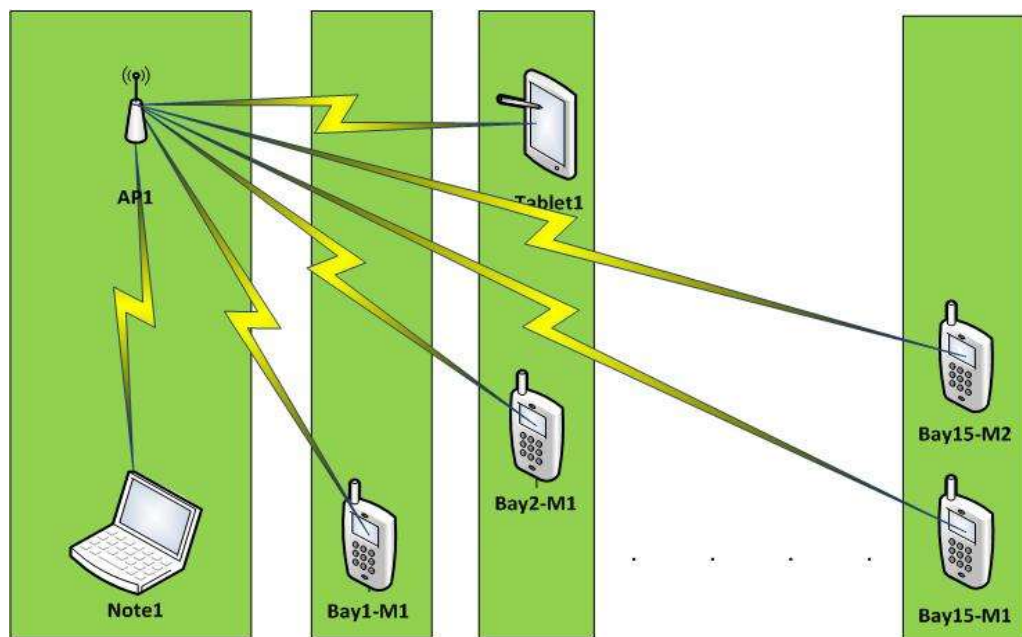


Рисунок 4.16 – Структурна схема локальної WiFi-мережі для обліку рухомих об'єктів

Існує обчислювальний метод виявлення об'єктів, що рухаються, на серії CCD-кадрів, але він передбачає лише малі рухи біля положення об'єкта [397]. Тому для обліку великорозмірних об'єктів – наприклад, контейнерів на судах або залізниці – доцільно розробити окремі апаратно-програмні засоби обліку таких об'єктів.

Так, у разі використання у якості переносних реєстраторів мобільних пристроїв, підписавши слухача у вигляді *SensorActivity* на зміну сенсорів такого пристрою, у методі *onSensorChange(SensorEvent)* відбувається обробка даних, отриманих із *Event*-об'єкта, що містить ці дані, зміна котрих і спричинила виклик

методу.

Акселерометр повертає масив, що містить три значення у m/c^2 (усі значення у системі одиниць SI):

- `values[0]`: Прискорення мінус G_x по осі X ;
- `values[1]`: Прискорення мінус G_y на осі Y ;
- `values[2]`: Прискорення мінус G_z на осі Z .

Датчик цього типу вимірює прискорення, що діє на пристрій Ad . Він робить це шляхом вимірювання сил, що діють на сам датчик F_s , використовуючи співвідношення (4.5):

$$Ad = - \sum F_s / mass. \quad (4.5)$$

Зокрема, сила тяжіння завжди впливає на виміряне прискорення:

$$Ad = - g - \sum F / mass. \quad (4.6)$$

По цій причині, коли пристрій лежить нерухомо та імовірно не прискорюється, акселерометр зчитує величину $G = 9,81 m/c^2$.

Точно так, коли пристрій знаходиться у стані вільного падіння, а отже змінює прискорення по напрямленню до землі на $9,81 m/c^2$, його акселерометр зчитує величину $0 m/c^2$.

Шляхом проведення експериментів було встановлено, що приблизне значення, при якому значення прискорення змінюється хоча б на одній з осей, є «1» (одиниця). Тобто, якщо різниця минулого зафіксованого будь-якого із осьових значень є більшими за «1», то фіксація руху на зображенні камери не відбудеться.

Аналогічні процедури проводяться для пристроїв, що мають сенсор, сприйнятливий до змін значення магнітного поля. У даному випадку, граничними значенням, що спиняє процес роботи фіксації камерою, є також «1» (одиниця), що отримано шляхом апроксимації експериментально отриманих

даних. Фіксація руху великорозмірного вантажу відбувається, наприклад, у разі виявлення переміщення морського контейнера над мобільним пристроєм (рис. 4.17).

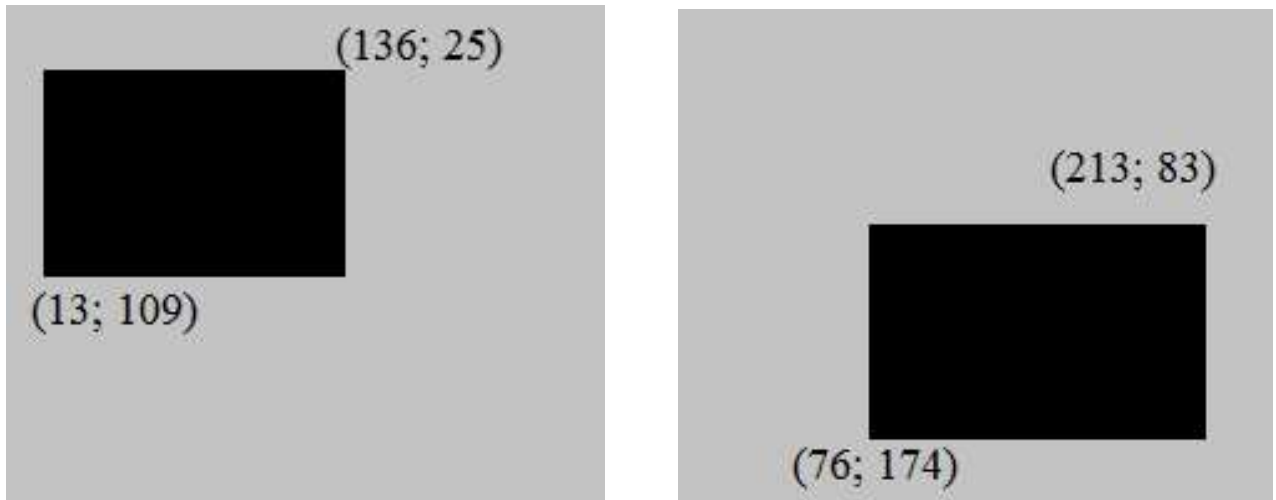


Рисунок 4.17 – Виявлення переміщення контейнера над мобільним пристроєм

Для отримання достовірних даних, потрібно виключити випадок дублювання фіксації одного й того ж контейнера, що проходить за приблизно однаковий проміжок часу. Для цього може бути використаний метод *callback*, котрий відповідає за отримання байтів із зображення, зробленого камерою. Тоді в *onPreviewFrame(byte[], Camera)* першим параметром є той самий масив байтів, котрий підлягає обробці, а другим – об'єкт камери, що фіксує зображення.

Частота виклику цього методу операційною системою безпосередньо залежить від FPS (frames-per-second), встановленому на пристрої програмно. Це є значення частоти отримання кадрів за секунду. Можливі значення було отримано програмним шляхом із списку доступних FPS у пристрої – з методу *Camera.getSupportedFps()*.

UML-діаграма класів клієнтського застосунку пристрою-реєстратора наведена на рис. 4.18.

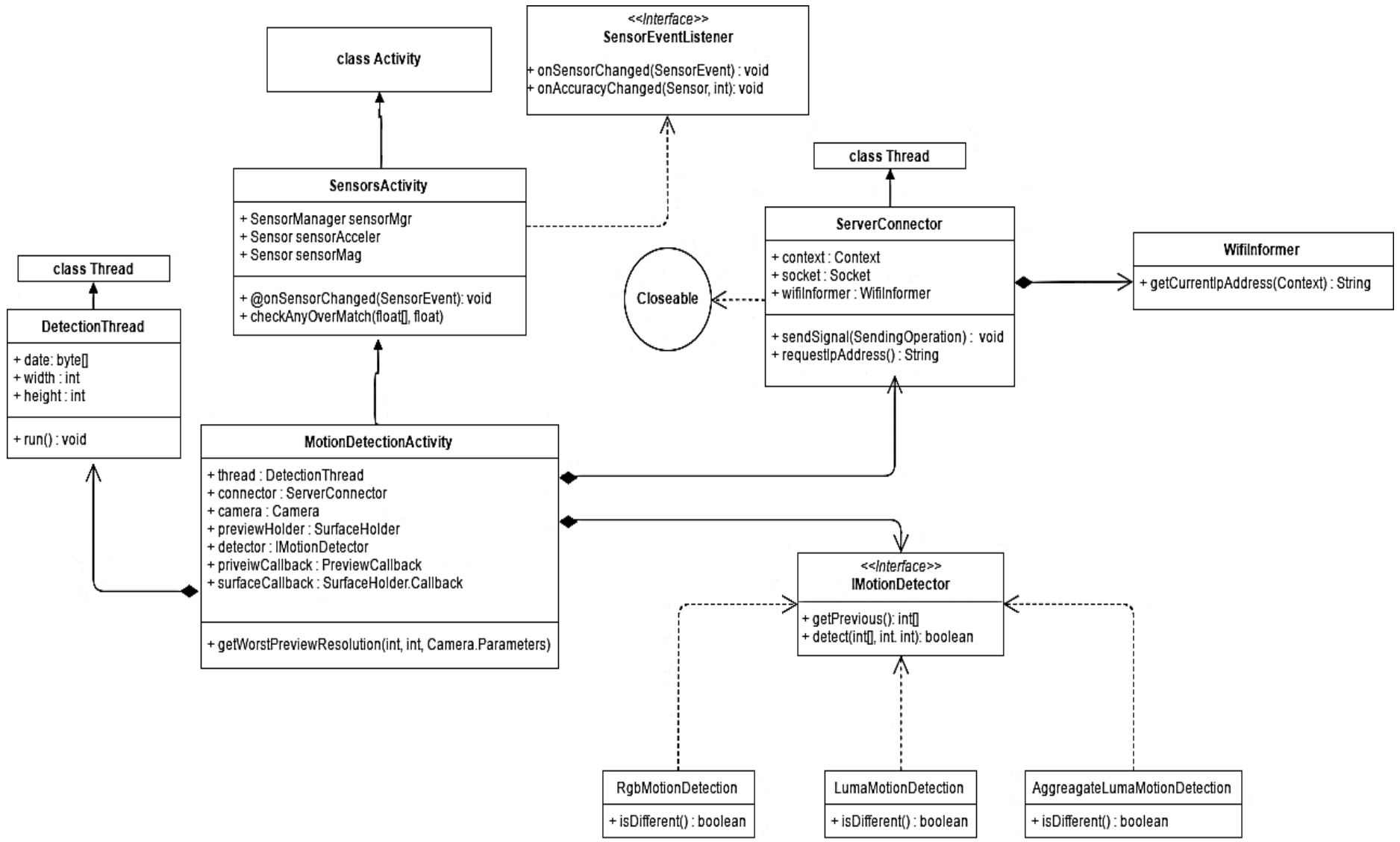


Рисунок 4.18 – Діаграма класів клієнтського застосунку програми «Motion Detector»

Експериментально було встановлено, що частоти у хоча б 1 кадр/с досягти неможливо програмним шляхом. Тому було вирішено налаштувати не частоту отримання кадрів, а лише проводити обробку зображення. Цей процес уміщує у собі конвертацію пікселів із формату YUV420SP у ARGB, перевірку даних акселерометра на нерухомість пристрою і перевірку схожості зображень попіксельно, щосекунди або за інші проміжки часу, які можна встановити програмно. «Старіння» даних при виконанні розрахунків для фіксації руху є неможливим, оскільки системний метод *onPreviewFrame* викликається із великою частотою FPS, що набагато більша за бажану частоту замірів, передаючи на обробку «свіжі» дані.

Візуальне оформлення програми повинно відображати зміни на сервері для особи, відповідальної за завантаження/розвантаження контейнерів, з використанням анімаційних ефекти, які безпосередньо залежать від даних, що надходять від пристроїв-реєстраторів. UX має бути ергономічним, компактним та функціональним одночасно та надавати можливість користувачеві своєчасно отримати інформацію не тільки про завантаженість беїв, а й про доступність пристроїв-реєстраторів та якість їх зв'язку з сервером.

Працездатність та навантаженість моніторингової облікової WiFi-мережі контейнеровоза була оцінена шляхом математичного моделювання зазначеної мережі за допомогою зв'язного графа [108, 225, 279].

Мережі Ad-Нос, або як їх ще називають бездротові самоорганізовані мережі, є децентралізованими бездротовими мережами, де всі вузли є рівноправними з точки зору управління мережею [83]. В таких мережах відсутні виділені сервери, де кожен вузол використовується або як клієнт, або для виконання функцій сервера, що дозволяє зберігати працездатність мережі при будь-якій кількості доступних вузлів. При функціонуванні мережі з різних причин можуть губитися зв'язки між окремими вузлами, тобто конфігурація мережі непостійна і, найчастіше, непередбачувана.

4.2.3 Розроблення математичної моделі мережі обліку великорозмірних об'єктів

Для мережі такої змінної топології РММ доцільно використовувати математичну модель невизначеності структури мережі як випадковий граф [329]. У такому разі оцінюються теоретико-ймовірнісні характеристики потоків у випадкових графах [95].

Представимо мережу у вигляді зв'язного графа $G = (V, U)$, де V – множина вершин або вузлів, U – множина ребер, та змінної множини W повідомлень (пакетів), які генеруються в ході роботи мережі. Розглянемо мережу з фіксованою кількістю вузлів n . Інші складові мережі вважатимемо випадковими.

Множина графа $G = (V, U)$ формується наступним чином: генерується випадкове число $|U|$ – потужність множини вершин, виходячи з дискретного розподілу ймовірностей PU . Далі з множини $V \times V \setminus \text{diag}(V \times V)$ рівноймовірно обирається $|U|$ різних вершин, які утворюють випадкову множину U' . Утворений граф $G = (V, U')$ – зв'язний (від дерева з однією вершиною до дерева з n вершинами), тоді $U' \in U$.

В мережі кожний вузол v_i , $i = 1 \dots n$ є джерелом потоку повідомлень w_i до деякого кореневого вузла v_j , $j = 1 \dots n$, $j \neq i$, в якому повідомлення цього потоку повинні оброблятися. Потік w_i – це випадковий дискретний процес з кінцевою кількістю подій передачі повідомлень. Кількість подій в потоці – випадкова величина з дискретним розподіленням ймовірностей PS . Її значення не перевищує числа P . Інтервали часу τ_i між послідовними подіями в потоці описуються функціями розподілу ймовірностей $A_i(x)$ – скільки вузлів буде задіяно для передачі повідомлення.

Первинні процеси w_i (проходження контейнера над вузлом-реєстратором) породжують потоки дублюючих повідомлень, кожне передане повідомлення в мережі йде через цільовий вузол обробки. При надходженні повідомлення до цільового вузла, воно обробляється протягом часу σ_i з функцією розподілу

ймовірностей $R_i(x)$ (через перевантаження центрального вузла і створення черги FIFO).

Сумарно первинні процеси утворюють багатовимірний (розподілений по вузлах мережі) випадковий процес W з кінцевим числом подій. Цей процес не визначається однозначно лише множиною первинних процесів $\{w_i\}$. Він залежить також від алгоритму R маршрутизації. Використовується маршрутизація, заснована на прогнозі часів очікування та обробки повідомлення від вузла-джерела до цільового вузла. Основними завданнями аналізу є вивчення таких характеристик розподіленого випадкового процесу W :

- 1) час α відповіді на повідомлення від моменту генерації вузлом-джерелом до моменту одержання його цільовим вузлом);
- 2) час β обробки потоку дублюючих повідомлень (від генерації першого повідомлення до отримання останнє повідомлення з одної секції);
- 3) відношення числа повідомлень у процесі W до загальної можливості надходження подій в первинних процесах $\{w_i\}$.

Обчислимо функції розподілу ймовірностей, при наведених умовах (4.7):

$$\begin{aligned} RM(x) &= P\{\alpha \leq x\}, \\ RS(x) &= P\{\beta \leq x\}, \end{aligned} \tag{4.7}$$

для кількості вузлів в мережі $n = 1 \dots 20$.

Порядок генерації функції моделювання ймовірностей надходження повідомлень на кореневий вузол наведена на рис. 4.19.

Враховуючи, що в портах зазвичай не задіють більше чотирьох кранів для завантаження/розвантаження одного судна, можливо ввести функцію вибору ймовірнісного розташування кранів та вибору секції, з якою працюють портокрани.

При імітації систем великих масштабів, для оцінки стійкості даних необхідно коректне обчислення параметрів, при яких виконання таких систем

буде надійним.



Рисунок 4.19 – Порядок генерації функції моделювання ймовірностей надходження повідомлень на кореневий вузол

Розглянемо ці параметри і залежність кінцевих даних від цих змінних:

а) кількість вершин графа $|V|$;

б) кількість згенерованих розміщень вершин графа. Для отримання коректних даних необхідні розгляд і обчислення даних по всім можливим генераціям графа. Тобто, маючи $|V|$ кількість вершин, потрібно розглянути всі можливі варіанти генерацій цих графів, кожен раз генеруючи новий набір розміщень вузлів з множини V ;

в) кількість надісланих повідомлень з кожного графа. Після генерації графа необхідно проходження певної кількості тестів для виявлення надійних даних (порядок повідомлень повинен йти в порядку зростання номеру вершин);

г) розмірність потоку (знаходження дублюючих). Варто враховувати, що при кожному проході відбувається повторне породження потоків повідомлень $w_i \in W$ однієї і тієї ж розмірності.

Таким чином, досліджена проблема, пов'язана із функціонуванням сучасних бездротових комп'ютерних мереж, які розгортаються в межах відокремленого технологічного об'єкта (наприклад, судна-контейнеровоза). Побудована математична модель для проведення оцінки вартості потоків на графах сегментів бездротової комп'ютерної мережі при розвантаженні контейнеровозів та розраховано навантаження трафіка сегменту топології мережі для вантажного плану на 4 секції.

Розроблені рішення щодо реєстрації великорозмірних вантажів працездатні для гетерогенної мережі з великою кількістю реєстраторів при обмеженому доступі до Інтернету, необхідному лише під час синхронізації даних з декількох пунктів обліку задля формування необхідної статистики в реальному часі. Таким чином вирішується проблема відшкодування витрат і підвищення рентабельності впровадження моніторингової мережі на базі мобільних пристроїв, що розміщуються за місцем моніторингу за допомогою БПЛА.

Запропонований метод обліку великорозмірних вантажів із запобіганням подвійної реєстрації об'єктів розрахований на роботу у локальній мережі, що суттєво знижує вартість такої системи у порівнянні з існуючими аналогами, які потребують наявності зв'язку або з супутниками, або з глобальною мережею. Також відсутні додаткові витрати на попереднє електронне маркування вантажів.

Для подальшого розвитку методу реєстрації великорозмірних об'єктів доцільно дослідити можливості датчика освітленості мобільних пристроїв у разі тривалого перекриття такого датчика об'єктом, що рухається.

4.3 Розроблення та впровадження методу стеганографічного закриття в телекомунікації між БПЛА на основі Open Source протоколу MAVLink

У швидкодинамічних гетерогенних мережах дані, що передаються засобами бездротової мережі з використанням БПЛА у якості вузлів РММ, найчастіше мають комерційний характер та можуть бути віднесені до інформації з обмеженим доступом, яка потребує додаткових заходів щодо забезпечення її

конфіденційності.

Для передачі даних між вузлами РММ найчастіше використовується телекомунікаційний протокол MAVLink (Micro Air Vehicle Communication Protocol), доступний за ліцензією LGPL [121]. MAVLink – це відкритий комунікаційний протокол, який підтримуються більшістю відкритих польотних контролерів: APM/Pixhawk, MultiWii, Navio та ін. За допомогою MAVLink можна відправляти керуючі команди, задавати місії і отримувати телеметрію. З часу своєї появи його почали використовуватися не тільки для мікроавіації (copter, plane тощо), але і для управління мікромашинами, катерами та навіть підводними човнами. Залежно від типу транспортного засобу та використовуваного контролера, функціонал дещо відрізняється.

Найчастіше у ролі корисної інформації виступає відеосигнал і GPS-координати БПЛА, які передаються у РММ засобами протоколу MAVLink. Однак, зазначений протокол має недостатній рівень захисту [24, 46], тому інформація, що передається з його використанням, може бути перехоплена сторонніми особами, а сам дрон – знищений.

Тому доцільно розробити стеганографічний метод вбудовування GPS-координат БПЛА у відкриті дані, які передаються за допомогою протоколу MAVLink.

В якості вхідних даних вибрані кліматичні дані (температура, тиск, вологість, швидкість вітру, освітленість тощо), а також зашумленість, напруженість електромагнітного поля та інші, передача яких здійснюється пакетами розміром 256 бітів. На борту БПЛА знаходиться не менше 8 датчиків для вимірювання параметрів навколишнього середовища,

За допомогою методу стеганографічного закриття у вхідні дані впроваджуються GPS-координати, розмір яких становить 128 бітів.

Координати записуються у вигляді числа з плаваючою комою за стандартом IEEE 754-2008 (рис. 4.20).

парний, то прийшов перший пакет, інакше – другий.

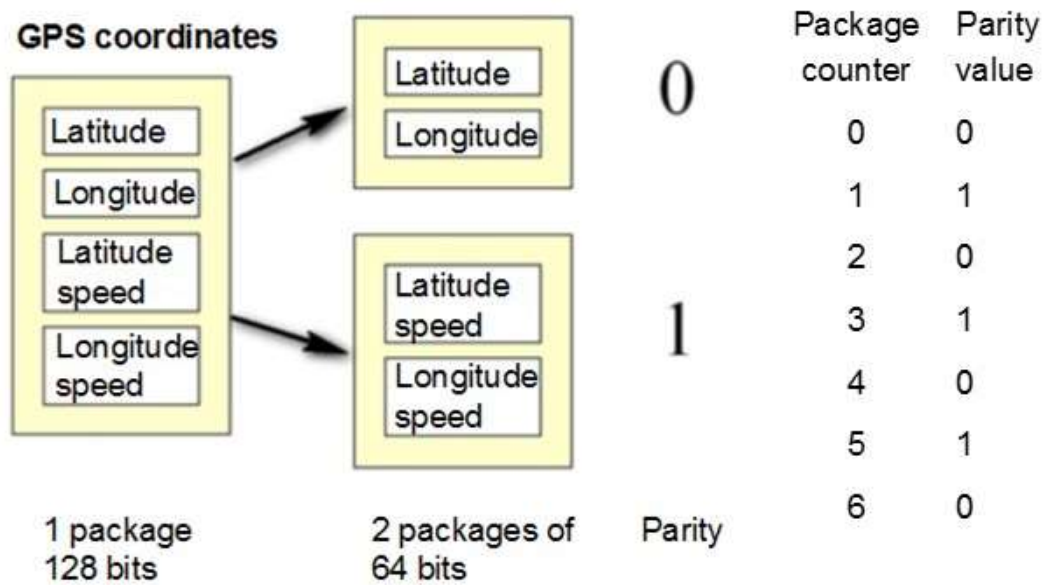
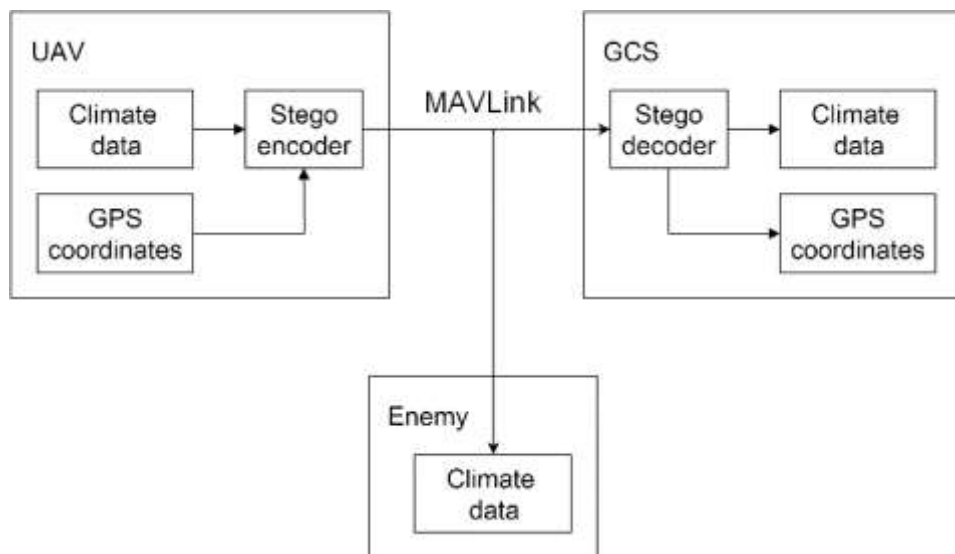
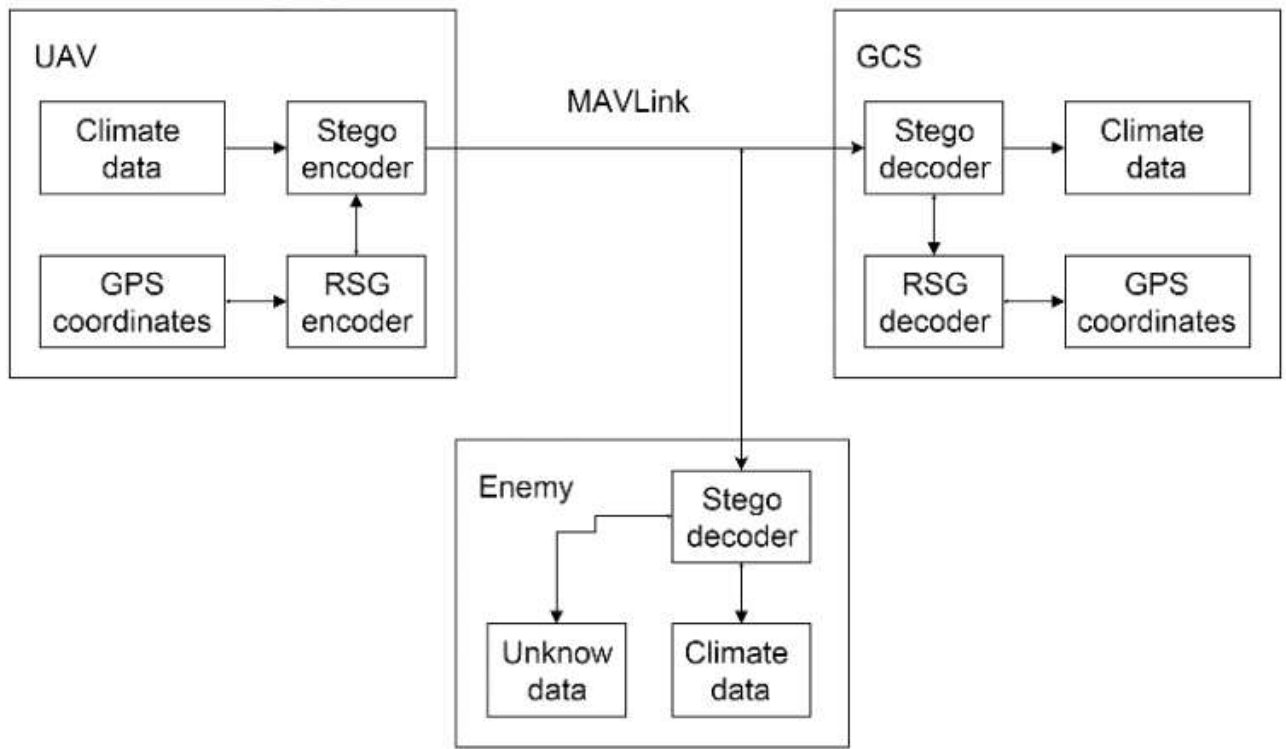


Рисунок 4.22 – Впровадження лічильника парності в пакет передачі GPS-координат

Другу проблему запропоновано вирішувати за допомогою класичного методу стеганографії (рис. 4.23, а), модифікованого шляхом додаткового кодування даних послідовністю випадкових чисел (рис. 4.23, б). При цьому створюється послідовність випадкових натуральних чисел, довжина якої дорівнює кількості бітів даних, після чого біти виставляються по даній послідовності та вбудовуються у вихідні дані методом стеганографії [372].



а)



б)

Рисунок 4.23 – Метод стеганографії класичний (а) та з додатковим кодуванням даних (б)

Зазвичай кліматичні дані передаються з БПЛА відкритим способом. У той же час, дані вимірювання радіаційного, акустичного та електромагнітного фону, а також GPS-координати (тобто, місцезнаходження самого БПЛА), доцільно відправляти з БПЛА на обробку в стегоконтейнері (рис. 4.24).

Послідовність генерується і записується в програмний код на етапі прошивки БПЛА (див. рис. 4.24), тим самим обмежуючи можливість отримання інформації про неї сторонніми особами (Enemy). Розпізнати послідовність в адекватні терміни практично неможливо в зв'язку з її великим розміром, який дорівнює 128 натуральним числам.

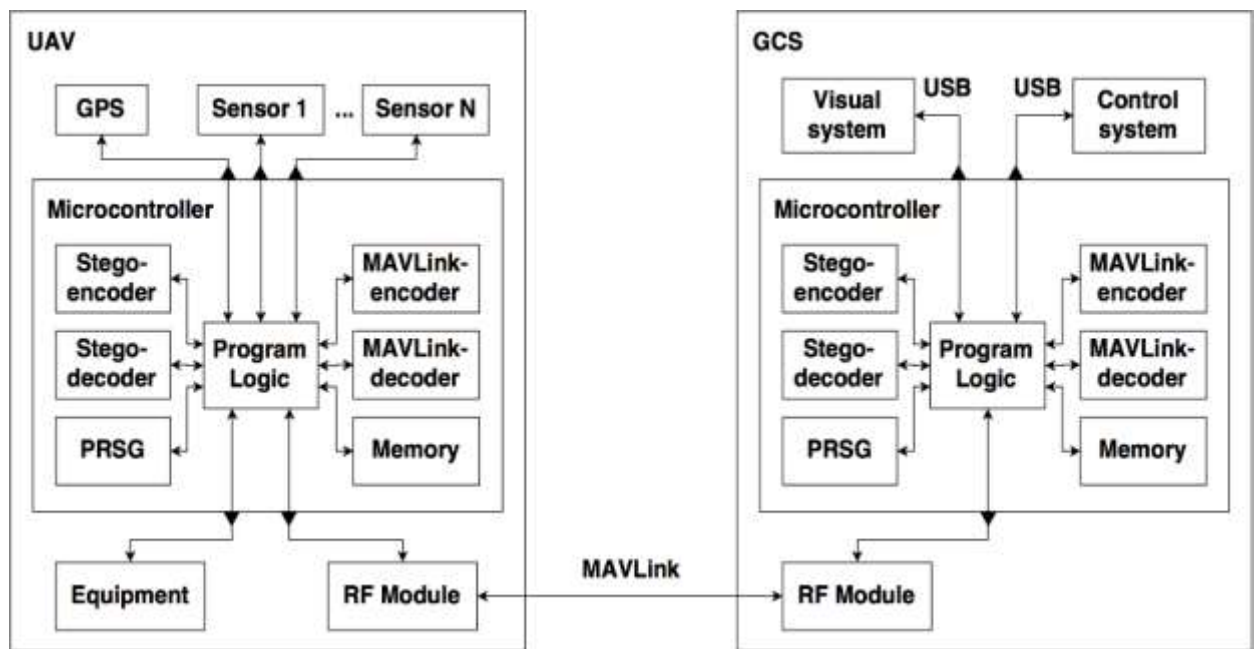


Рисунок 4.24 – Взаємодія БПЛА з КЦ за протоколом MAVLink з використанням стегоконтейнера

Впровадження стегоконтейнера у відкриті дані відбувається за наступним алгоритмом:

Крок 1. 8 значень з датчиків створюють послідовність дробових чисел, яка дублюється для надійності даних.

Крок 2. В отриманій послідовності з 16 значень виділяються останні 8 біт даних кожного значення, що в сумі становить 128 біт для стегоконтейнера.

Крок 3. За допомогою випадкової послідовності з 128 цілих чисел від 0 до 128 визначається особливий порядок запису бітів прихованої інформації в стегоконтейнер.

Крок 4. Після цього формується повідомлення.

Крок 5. За допомогою протоколу MAVLink повідомлення пересилається на наземний КЦ або наземному оператору. Там ці дані розкриваються за такою ж послідовністю чисел. Частота передачі даних становить 1 раз на секунду.

Існує ймовірність, що при виявленні РММ на території, сторонні особи здійснять перехоплення прихованих даних і захотять розкрити їх. Наведений вище алгоритм стеганографії дуже простий. Тому достатньо буде менше півгодини для здійснення стегоаналізу прихованих даних, якщо будуть

застосовані спеціальні інструменти форензіки [38].

В зв'язку з цим запропоновано впровадити у вищеописаний алгоритм стеганографії додатковий алгоритм випадкової послідовності. За цим алгоритмом послідовність бітів повинна бути перетасована випадковим чином.

Алгоритм стеганографії з впровадженням випадкової послідовності буде доповнений такими кроками:

Крок 3а. Обрати ключ, за яким будується випадкова послідовність (*seed*).

Крок 3б. Створити послідовність від 1 до *n* (*seq*).

```
while(s<6){
  i = 0;
  t = seed+(6-s)*s;
  while(i<size){
    if(t&27){
      tmp = seq[i];
      i2 = i*s+t;
      i2 %= size;
      seq[i] = seq[i2];
      seq[i2] = tmp;
      t = roll_bits(t);
    }
    i++;
  }
  s++;
}
```

Всього бітів даних 128, і по формулі перестановок при спробі стегоаналізу перехоплювачу знадобиться перебрати 128! варіантів послідовності чисел, тобто більше $3,85462 \cdot 10^{215}$ перестановок. Таким чином, на криптоаналіз буде витрачений часу набагато більше ніж час актуальності даних, що передаються.

На додачу до використання стеганографії, захищеність каналів зв'язку між БПЛА підвищується також завдяки передаванню інформації на основі протоколу MAVLink. Цей протокол може підтримувати зв'язок у мережі з кількістю БПЛА у зграї до 255 одиниць [119].

Оскільки наведене рішення має малу ступінь складності алгоритмізації, система буде працювати стабільно і практично без затримок, що дозволить власнику – наземній станції управління (англ. Ground control station або GCS) –

управляти БПЛА навіть в екстремальних ситуаціях і при великих швидкостях руху РММ.

Таким чином, застосування запропонованого рішення дозволяє приховати місцезнаходження БПЛА, й тим самим збільшити термін його життя у зв'язку з неможливістю визначити його місцезнаходження сторонніми особами у разі перехвату трафіка UAV – GCS.

Натурне моделювання стеганографічного вирішення задачі можливо провести на основі двох різних апаратних рішень:

– мікроконтролера ATmega32 (рис. А.2, а) з характеристиками: пам'ять 32 кбайт, тактова частота 8 МГц, розрядність процесора 8 бітів, а також системна плата та програматор до нього,

– плати STM32F429 Discovery (рис. А.3) з характеристиками: пам'ять 2 Мбайт, тактова частота 16 МГц, розрядність процесора 32 бітів.

Плата STM32F429 Discovery має вже вбудований програматор ST-LINK, тому програматор має бути обраний тільки для ATmega32. Був обраний найпоширеніший (для цього виду мікроконтролерів) програматор USBasp v2.0 (див. рис. А.2, б). В якості пристроїв комунікації у контролерів ATmega32 та STM32F429 Discovery використовуються вбудовані модулі USART (Universal Synchronous and Asynchronous Serial Receiver and Transmitter) для передачі даних. Вони працюють незалежно від коду програми, таким чином мають велику стійкість від помилок. Компоненти та кінцевий вигляд макету для натурального моделювання наведені у додатку А.4 (рис. А.4).

Для роботи системи треба її апаратні модулі з'єднати між собою. Для цього можна використати або кабельні, або бездротові з'єднання, нп. RF-передавач/приймач (рис. 4.25). Зелені індикатори (зверху) показують передачу даних, а червоні (знизу) – що дані були прийняті. Червоний індикатор UAV блимає з частотою приблизно 40 Гц, тому око не може побачити це блимання. Індикатор GCS блимає у два рази рідше (20 Гц) – його можна побачити.

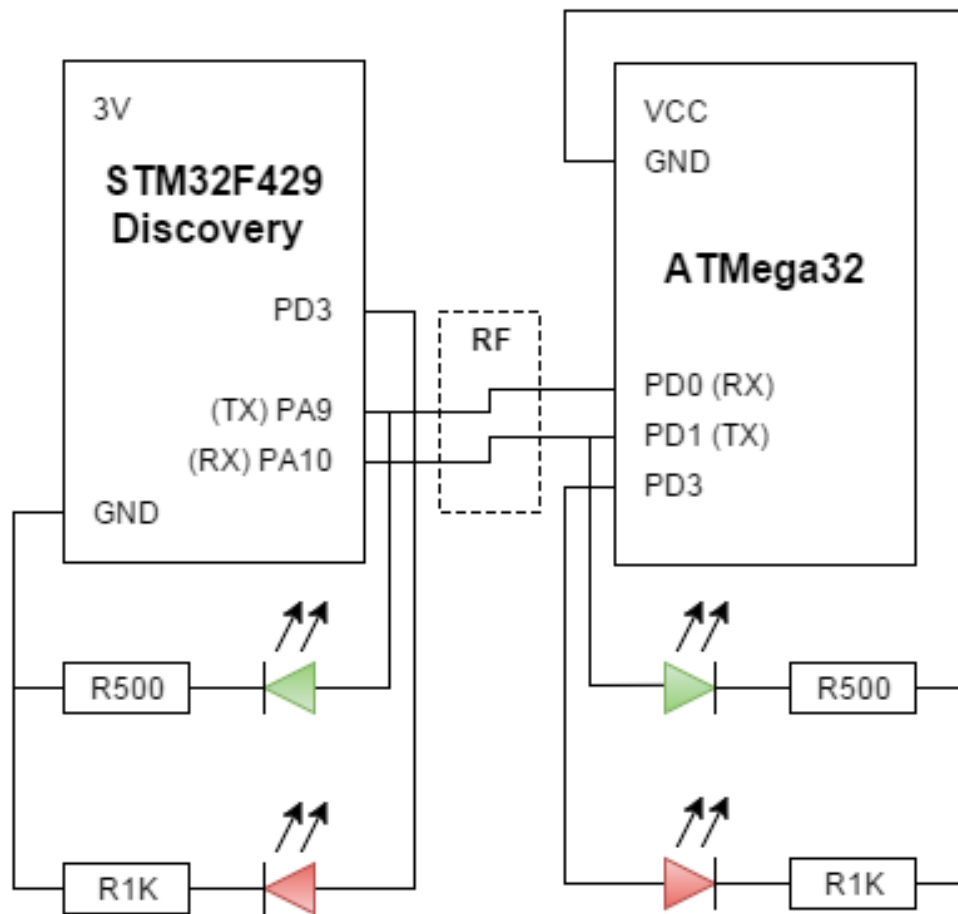


Рисунок 4.25 – Схема підключення модулів апаратної частини

Після остаточного вибору апаратних засобів, встановлюються драйвери для цих програматорів на персональний комп'ютер. Для програматора ST-LINK драйвер завантажується з офіційного сайту STMicroelectronics [179], а для програматора USBasp v2.0 – за посиланням [202].

Для запуску процесу натурального моделювання стеганографічного рішення передачі даних в PMM необхідно налаштувати деякі параметри мікроконтролеру та плати:

1. Додати заголовки до проекту:

а) для ATmega32:

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
```

б) для STM32F429 Discovery:

```
#include "stm32f4xx.h"
#include "stm32f4xx_gpio.h"
#include "stm32f4xx_rcc.h"
#include "stm32f4xx_usart.h"
```

2. Налаштувати порти USART (*baud_b* – швидкість обміну даними):

а) для ATmega32:

```
UBRRH = baud_b>>8;
UBRRL = baud_b&0xFF;
UCSRB = (1<<TXEN) | (1<<RXEN) | (1 << RXCIE );
UCSRC = (1<<URSEL) | (1<<UCSZ1) | (1<<UCSZ0);
```

б) для STM32F429 Discovery:

```
RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOA, ENABLE);
GPIO_InitTypeDef gpio;
gpio.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF;
gpio.GPIO_Pin = GPIO_Pin_9 | GPIO_Pin_10;
gpio.GPIO_Speed = GPIO_Speed_2MHz;
gpio.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
gpio.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_UP;
GPIO_Init(GPIOA, &gpio);
GPIO_PinAFConfig(GPIOA, GPIO_PinSource9, GPIO_AF_USART1);
GPIO_PinAFConfig(GPIOA, GPIO_PinSource10, GPIO_AF_USART1);

RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_USART1, ENABLE);
USART_InitTypeDef usart;
usart.USART_StopBits = USART_StopBits_1;
usart.USART_WordLength = USART_WordLength_8b;
usart.USART_Mode = USART_Mode_Rx|USART_Mode_Tx;
usart.USART_BaudRate = speed;
usart.USART_Parity = USART_Parity_No;
usart.USART_HardwareFlowControl =
USART_HardwareFlowControl_None;
USART_Init(USART1, &usart);
USART1->BRR = baud_b*15;
USART_Cmd(USART1, ENABLE);
```

3. Активізувати системні переривання:

а) для ATmega32:

```
sei();
```

б) для STM32F429 Discovery:

```
__enable_irq ();
USART_ITConfig(USART1, USART_IT_RXNE, ENABLE);
NVIC_EnableIRQ(USART1_IRQn);
```

При надходженні даних викликається системне переривання:

а) для ATmega32:

```
ISR(USART_RXC_vect){
    if(uart_reciever)
        uart_reciever(UDR);
}
```

б) для STM32F429 Discovery:

```
void USART1_IRQHandler(){
    if ((USART1->SR&USART_FLAG_RXNE) != RESET){
        if(uart_reciever)
            uart_reciever(USART1->DR);
    }
    USART_ClearITPendingBit(USART1, USART_IT_RXNE);
}
```

Функція *mavlink_parse_char* отримує прийнятий байт з іншої одиниці системи та записує її у власний буфер. Якщо всі байти повідомлення прийшли коректні, функція повертає додатне значення, що каже про успішність отримання даних.

Функції *heartShow* та *gpsShow* посилають на 3-й порт сигнал, який повідомляє про те, що дані були успішно отримані.

GCS кожні 10 мс посилає пустий пакет *heartbeat* до UAV. В свою чергу, UAV, після отримання цього пакету, надсилає GCS-дані про свої GPS-координати.

Дані передаються на частоті 433 МГц (входить в діапазон LPD433) або на іншій частоті ISM-діапазону.

Для комп'ютерного моделювання стеганографічного рішення існують різноманітні середовища розробки, але не всі мають змогу працювати з тим чи іншим типом мікроконтролерів та плат. Тому для обраних апаратних засобів найкращими середовищами розробки є CoIDE [40] компанії CooCox для плати STM32F429 Discovery, та AVR Studio 5.0 [17] компанії Atmel для мікроконтролеру ATmega32.

Процес завантаження, встановлення середовищ розробки, створення та збереження проекту в одній папці для спрощення доступу до спільних файлів кожного з них наведений у додатку А.4 (рис. А.5 – рис. А.6).

Наступним етапом є підключення протоколу MAVLink та створення повідомлення.

Протокол MAVLink використовується одночасно для комунікації між GCS та UAV, або UAV – UAV та *header-only C* бібліотекою (містить лише заголовки).

Бібліотека MAVLink для мови програмування C зберігається також в папці проектів для швидкого доступу (рис. А.7) та підключається до проекту в налаштуваннях проекту у розділі «*Compiler – Include Paths*» з вказанням директорії, в якій знаходиться завантажена бібліотека.

Для створення повідомлення завантажується генератор MAVLink-повідомлень [120], написаний на інтерпретаторі Python, який також встановлюється та запускається файлом *mavgenerate.py* (рис. А.8).

Перший етап створення повідомлення – це створення XML-файлу, в якому записана структура повідомлення. Для даних про клімат була створена наступна структура (рис. 4.26):

```
<?xml version="1.0"?>
<mavlink>
<include>common.xml</include>
  <enums>
</enums>
  <messages>
    <message id="200" name="SENSORS_DATA">
      <field type="uint32_t" name="count"></field>
      <field type="float" name="pressure"></field>
      <field type="float" name="temperature"></field>
      <field type="float" name="humidity"></field>
      <field type="float" name="illumination"></field>
      <field type="float" name="noisiness"></field>
      <field type="float" name="wind_speed_x"></field>
      <field type="float" name="wind_speed_y"></field>
      <field type="float" name="em_intensity"></field>
    </message>
  </messages>
</mavlink>
```

Рисунок 4.26 – Структура даних повідомлення про клімат

Наведена структура містить в собі дані про тиск, температуру, вологість, освітленість, рівень шуму, швидкість вітру, напруженість електромагнітного поля, а також лічильник парності, який надалі знадобиться для стеганографії.

Підключення файлу *common.xml* необхідно для того, щоб у згенерованій бібліотеці були присутні всі стандартні види повідомлень MAVLink.

ID повідомлення – це найважливіша частина структури, адже за цим значенням протокол MAVLink визначає, що за повідомлення було отримано.

Назва створеного повідомлення `SENSORS`. Всі параметри, окрім лічильника – дійсні числа, тому що показники клімату мають дійсну природу. Також це знадобиться для реалізації стеганографічного рішення [371, 372].

Другим етапом створення повідомлення є компіляція створеного XML-файлу. У вікні генератора MAVLink обирається цей XML-файл, а в якості папки для виводу обирається папка, де знаходиться C-бібліотека MAVLink (рис. А.9, а). Обирається мова програмування C та протокол MAVLink версії 1.0, після чого натискається кнопка «генерувати», в результаті чого створюється нова бібліотека з новим типом повідомлення (рис. А.9, б).

На наступному етапі до проекту додається ініціалізація протоколу MAVLink (рис. А.10). Функція `mavlink_msg_sensors_data_encode` кодує дані типу `sensors_data` у повідомлення, а потім це повідомлення кодується у потік байтів функцією `mavlink_msg_to_send_buffer`.

Структура `gps_data`:

```
typedef struct __gps_data{
    float latitude;
    float longitude;
    float vlatitude;
    float vlongitude;
} gps_data;
```

Таким чином, були створені повідомлення та дані про клімат та про GPS-координати. Після цього вони запаковуються та відправляються у буфер, який буде використовуватися для відправлення даних до інших компонентів системи.

На наступному етапі створення зазначеної системи необхідно провести аналіз швидкості роботи та передачі даних в системі.

На швидкість роботи розробленої системи мають вплив:

- швидкість процесора;
- швидкість USART;
- обсяг даних, що передається;
- кількість операцій для кодування та декодування даних.

Як вже було зазначено, тактова частота процесора ATmega32 становить

8 МГц, а STM32F429 Discovery – 16 МГц. Модулі система можуть взаємодіяти тільки по найнижчому показнику, тому для обрахунків береться 8 МГц.

Швидкість USART також не може перевищувати швидкість процесора, тому, після здійснення багатьох спроб налаштування швидкості, була визначена максимальна швидкість, при якій зв'язок залишається стабільним – 55 кбіт/с.

Один пакет повідомлення MAVLink містить $8+n$ байтів даних, де n – довжина самого повідомлення. Передаються 9 значень по 4 байти кожне, тому один пакет має розмір $8 + 9*4 = 44$ байти = 352 біта. Для порожнього пакету це буде 16 байтів = 128 бітів (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Обрахування часу створення та передачі повідомлення

Назва етапу	Кількість операцій на етапі (оп.)	Швидкість виконання етапу (кбіт/с)	Час виконання етапу (с)
Створення порожнього пакету	25000	8000	3,1
Відправлення порожнього пакету	128	55	2,3
Зчитування порожнього пакету	35000	16000	2,2
Створення кліматичного пакету	30000	16000	1,9
Відправлення кліматичного пакету	352	55	6,4
Зчитування кліматичного пакету	40000	8000	5,0
Сумарний час			20,9

За результатами натурального моделювання визначено, що для створення пакету с кліматичними даними та стежоконтейнером у вигляді GPS-координат необхідно приблизно 30 тис. операцій, а для зчитування цих даних – 40 тис. операцій. Для створення порожнього пакету необхідно 25 тис. операцій, а для зчитування – 35 тис. операцій. Враховуючи вищенаведене, можливо поетапно обрахувати швидкість роботи системи (див. табл. 4.3).

Таким чином, на весь цикл обробки одного повідомлення витрачається час 20,9 мс (з урахуванням можливих затримок або помилок округлюється до 25 мс). Тоді за 1 с буде передано 40 повідомлень. Але, з урахуванням того, що GPS-координати передаються за 2 пакети, швидкість отримання GPS-координат дорівнює 20 разів на секунду.

Система була протестована на стабільність зв'язку. Якщо перервати зв'язок у деякий час, а потім встановити його знову – система продовжуватиме працювати, тобто є достатньо стабільною.

Висновки до Розділу 4

1. Набув подальшого розвитку метод гарантованої доставки інформації між КФО з використанням трансферних вузлів та хмарних сервісів (на прикладі хмарного сервісу Google Firebase) за рахунок зміни протоколу взаємодії між КФО шляхом додання параметрів режиму функціонування БПЛА та умов їх настання, що дозволяє забезпечити функціонування ШГКМ при відсутності зв'язку між КФО. Запровадження такого підходу дозволить здійснювати тимчасове зберігання часткових даних на хмарному сервісі з наступною їх відстроченою синхронізацією між декількома об'єктами гетерогенної рухомої мережі БПЛА. Такий підхід також суттєво підвищує безпеку поточної інформації щодо функціонування БПЛА у разі перехоплення Об'єкта сторонніми особами.

2. Запропонований алгоритм реєстрації великорозмірних вантажів із запобіганням подвійної реєстрації вантажу та реєстрації руху сторонніх об'єктів за рахунок знаходження градієнту зображення цільового об'єкта з використанням у якості реєстраторів мобільних пристроїв з обмеженими обчислювальними можливостями, що переносяться БПЛА.

3. Удосконалено метод підвищення криптостійкості передаваних повідомлень зі стеганографічним закриттям корисної інформації за рахунок розміщення GPS-координат БПЛА у стегоконтейнері в межах вільного місця кадрів протоколу передачі відкритих даних, які передаються за допомогою протоколу MAVLink відкритими каналами зв'язку, що дозволяє підвищити

рівень безпеки функціонування ШГКМ та при перехопленні трафіка скрити у переданій інформації дані щодо місцеположення БПЛА. Проведене натурне та комп'ютерне моделювання розробленої системи. Визначений час повного циклу створення та обробки повідомлення у каналі зв'язку РММ в залежності від обраних комп'ютерних компонентів.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ТА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РУХОМОЇ МОНІТОРИНГОВОЇ МЕРЕЖІ

5.1 Покращення ефективності використання БПЛА шляхом розподілу завдань між ядрами процесора

5.1.1 Аналіз ефективності розподілу завдань між ядрами обчислювального процесора БПЛА

Є багато способів вирішення проблем, пов'язаних зі збільшенням часу автономної роботи рухомого пристрою. Це і збільшення обсягу батареї, оптимізація програмних продуктів, а також покращення режимів роботи основних модулів мобільного пристрою, які потребують великої кількості енергії. Останній підхід є одним з найперспективніших. Одним з найбільш енерговитратних модулів системи є процесор, тому підвищення ефективності роботи цього модулю на алгоритмічному рівні може значно покращити ефективність використання мобільного пристрою.

Тому перспективним є організація ефективного розподілення навантаження процесорів мобільних об'єктів ШГКМ між ядрами процесора кожного об'єкта для зменшення рівня енергоспоживання мобільних об'єктів на базі ОС Android, iOS, Windows Phone та ін. ОС низькоресурсних обчислювачів. Для цього необхідно розробити нові методи покращення енергоживлення, розподілення енергоресурсів, що направлені на зменшення енергоживлення кожного ядра у багатоядерній енергообмеженій системі.

Зважаючи на те, що багатоядерні процесори деяких об'єктів ШГКМ не є технологічно однаковими, вирішення проблеми економії енергоспоживання процесора може полягати у розподілі задач між кластерами, до яких належить те чи інше ядро. При сучасній трикластерній технології енергоекономні ядра нижніх кластерів процесорів (нп., Cortex-A53 з частотою 1,0–1,8 ГГц, Snapdragon 6xx та 8xx з частотою 1,6 ГГц) доцільно задіяти на максимум потужності для

обробки поодиноких сигналів від вимірювальних датчиків фізичних величин. Окремий сопроцесор i6 в технологіях Apple також призначений для налаштувань задля обробки даних з гіроскопу, барометру, малопотужного GPS, акселерометра й т. п. сенсорів БПЛА. Крім того, при виконанні таких завдань енергоекономними ядрами, нагрів чіпсета практично відсутній.

Більш потужні ядра верхніх кластерів (нп., Cortex-A72 з частотою до 2,5 ГГц, Snapdragon 8xx з частотою 2,15–2,4 ГГц) в такому разі мають бути задіяними на 60–70 % при виконанні подібних завдань. На повне навантаження вони використовуються лише при виконанні задач оптичного розпізнавання, обробки аудіо- та ін. мультимедійних завданнях.

Такий перерозподіл завдань між ядрами різних кластерів процесора дозволяє платі-обчислювачу БПЛА споживати майже вдвічі менше енергії, що суттєво подовжує час життя апарату.

Слід зазначити, що виробниками процесорів для мобільних пристроїв від Apple, Huawei, Mediatek докладено значних зусиль щодо створення базових алгоритмів автоматичного розподілу завдань між кластерами багатоядерних процесорів. Але, такий розподіл в залежності від типу виконуваного завдання веде до того, що при обробці сигналів від сенсорів навантажені лише ядра нижнього кластера, а середній та верхній кластери при цьому простоюють. Навпаки, при обробці зображень та відео з камер БПЛА відключеними виявляються ядра нижнього кластера. В такому разі на ШГКМ чекають зайві витрати енергії на повторні включення ядер після режиму сну. Доцільно модифікувати базові алгоритми розподілу завдань таким чином, щоб усі ядра були навантажені постійно, на різному рівні енергоефективності, без витрат енергії на включення після сну та переключення частоти функціонування.

Для натурального експерименту щодо вирівнювання таймлайну поточного навантаження кожного з ядер процесора (коефіцієнту навантаження процесора) був обраний чіпсет Qualcomm Snapdragon 400 (з 4 ядрами Krait, тактова частота яких 1,4–1,7 ГГц), вбудований у смартфон Microsoft Lumia 640 під управлінням ОС Windows Phone 8.1. Цей вибір був заснований на тому, що ядра Krait мають

можливість асинхронної роботи, тобто, кожне ядро може бути керованим незалежно від інших, і його ресурси будуть використовуватися лише у разі потреби. В цьому і полягає відмінність *Krait* від рішень інших виробників, яким, з метою зниження енергоспоживання, необхідно використовувати п'яте енергозберігаюче ядро (нп., і6 в чіпсетах Apple) і об'єднувати групи ядер. Крім того, процесори Qualcomm Snapdragon можуть працювати під управлінням й інших ОС – Android, Linux та ін. [150].

Обчислювальні системи більшості безпілотних літальних апаратів (БПЛА) базуються на однокристальних 4-ядерних 32-бітних процесорах ARM Cortex, Qualcomm Snapdragon та ін. [42, 150, 191]. Кількість обчислювальних потоків в них дорівнює кількості фізичних ядер, між котрими можуть бути розподілені завдання, що виконуються (орієнтація у просторі, управління рухом, отримання та обробка показників з датчиків, тощо). В той же час, перше ядро може миттєво стати надзвичайно перевантаженим у разі виникнення термінового завдання від системи управління БПЛА.

Для КС з обмеженими ресурсами (обчислювальними або енергоживлення) виникає наступна проблема – робота автоматичного планувальника (англ. «scheduler») потоків ОС призводить до невиправданого навантаження процесора. Але для мобільних комп'ютерів, на яких базується конструкція БПЛА, частіше є важливим економічність в енергоспоживанні (на практиці – час роботи від акумуляторної батареї), ніж залучення в обчислювальному процесі усіх наявних ядер в однокристальному обчислювальному процесорі (англ. Central Processing Unit або CPU).

Тому актуальною задачею є підвищення ефективності використання БПЛА за рахунок розроблення кращих ніж автоматичні алгоритмів роботи багатоядерного процесора, на базі якого побудована обчислювальна система БПЛА.

Зважаючи на те, що безпосереднє натурне моделювання на БПЛА може привести до критичного застосування останнього, було вирішено провести імітаційне моделювання диспетчеризації завдань на стаціонарній КС з 4-ядерним

одноплатним процесором.

Тест проводився на КС з CPU Intel Core i7-4790 3.60GHz при вимкненій функції підтримки процесором технології Hyper-Threading [52]. Для експерименту була створена тестова програма, яка на кожній ітерації сортує масив з 10000 елементів.

В межах даної роботи розроблена вдосконалена модель диспетчеризації завдань обчислювача за рахунок навантаження ядер заданими потоками. Також здійснене еталонне зіставлення з автоматичною диспетчеризацією в ОС. Інакше цей процес можна визначити як бенчмаркінг ефективності використання ядер багатоядерного процесора.

Досліджувались такі критерії, як час виконання завдань, енергоспоживання процесора, температура та відсоткове навантаження кожного ядра та всього процесора протягом виконання кожного з тестових завдань чотирьох типів. Час виконання завдань оцінювався за результатами роботи розробленого програмного забезпечення. Температура (або тепловиділення – параметр TDP, Thermal Design Power), енергоспоживання та відсоткове використання процесора оцінені за допомогою попередньо запущеної моніторингової утиліти [221, 281].

Одним з найбільш проблемних місць є перевантаження та перегрів процесора обчислювальної системи БПЛА. Це може привести до зависання КС, втрати управління та крешу дрона. Крім того, у критичній ситуації перевантажений процесор не забезпечить терміново необхідні обчислення зміни курсу БПЛА або перехід на автономний режим польоту.

Підвищити ефективність використання БПЛА з подовженням часу польоту останніх можливо за рахунок зниження перенавантаження та енергоспоживання обчислювальної системи. Для цього необхідно вирішити наступні задачі:

- 1) проаналізувати можливість диспетчеризації завдань процесора БПЛА з багатопотоковою організацією розподілу завдань між ядрами CPU та розробити відповідні алгоритми;

- 2) виконати імітаційне моделювання роботи розроблених алгоритмів для 4-ядерного CPU;

3) дослідити технічні показники стану CPU КС БПЛА (температуру у розрізі по ядрах, енергоспоживання та навантаженість процесора, кількість обертів кулера для забезпечення необхідного тепловідводу тощо) при реалізації різних алгоритмів диспетчеризації;

4) дослідити можливість підвищення ефективності використання БПЛА за рахунок джерел додаткового енергоспоживання;

5) визначити з досліджених найбільш ефективний алгоритм розподілу завдань між ядрами багатоядерного однокристального процесора.

Проблема оптимізації енергоспоживання, навантаження та запобігання перегріву комп'ютерних компонентів обчислювальних систем БПЛА широко розглянута у ресурсах світової наукової періодики. Основним направленням її вирішення є багатопотокова диспетчеризація завдань між ядрами багатоядерного процесора [224, 237, 297]. Також існують різні технічні рішення, пов'язані з проектуванням процесорних кулерів для забезпечення необхідної теплової розсіювання [23, 349].

Однак, існуючі алгоритми планування розподілу завдань на рівні ОС [189, 366] неспроможні вирішувати проблему запобігання максимальному навантаженню процесора та кожного з його ядер майже до 100 % [200]. Крім того, можлива ситуація, коли завдання будуть стояти у черзі до процесора [188], що неприпустимо для завдань оптичної навігації та управління БПЛА.

Для зменшення енергоспоживання в системах, що живляться від батареї, іноді використовуються засоби відключення модулів зв'язку [22] під час швидкісного декодування даних або під час компресії отриманого відео [31, 106]. Але, у такому випадку може мати місце так званий ефект Дала, коли частина ядер процесора простоює, незважаючи на те, що своєчасність виконання деяких завдань не забезпечується [138]. Таке планування завдань є неприпустимим для БПЛА, тому що він, наприклад, не зможе прийняти керуючі сигнали від головного БПЛА або з наземного КЦ.

Втрати енергії на постійне підключення до батареї живлення модулів зв'язку можуть бути частково компенсовані за допомогою засобів, описаних у [220].

Передача надлишкової енергії між об'єктами КФС є вельми енергетично привабливою для вирішення поставленої задачі побудови ефективних інформаційно-вимірювальних мереж, до яких можна віднести й зграї БПЛА [197].

Оцінку ефективності вжитих заходів щодо підвищення ефективності використання компонентів КС можна провести за допомогою низки програмних продуктів для моніторингу та зміни режимів навантаження процесорів [43]. Однак, слід зауважити, що для КС БПЛА категорично не можна використовувати так звані «прожарочні тести» (AIDA64, LinX, IntelBurnTest, Prime95, OCCT Perestroika тощо). Принципом їх дії є стрес-тестування, коли процесор виконує спеціалізовані інтенсивні обчислення, що імітують сценарій роботи в найбільш важких умовах та призводять до максимального нагрівання ядер [32]. Застосування таких тестів може спричинити невиправні наслідки з вигоранням окремих компонентів КС. При введенні граничних значень в тестові режими таких утиліт можливо вивести досліджувану КС з ладу.

Тому для бенчмаркінгу доцільно застосувати програмне забезпечення (ПЗ), яке серед інших показників стану апаратного забезпечення КС виводить на монітор показання вбудованих в таку КС датчиків (Core Temp, CPU-Z, HWMonitor, SpeedFan й т. п.).

З перелічених для бенчмаркінгу була обрана утиліта HWMonitor v.1.33.0.

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок про те, що питання підвищення ефективності використання БПЛА потребують додаткових досліджень.

По-перше, доцільно детальніше розглянути проблему ефективного навантаження CPU у розрізі ядер процесора.

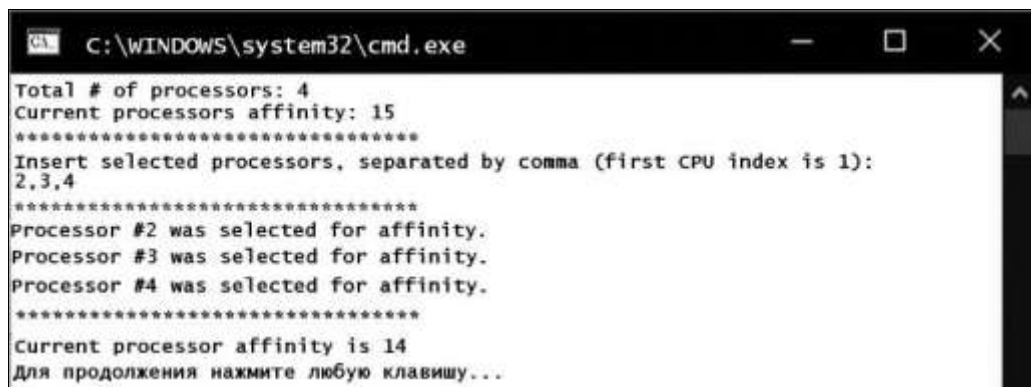
Прив'язка процесу до заданих ядер не викликає ніяких труднощів, потрібно лише скористатися властивістю *ProcessorAffinity* класу *Process*, прописаним в просторі імен *System.Diagnostics* [151]. Залежно від бітової маски, яка присвоюється цій властивості, можна отримати всі комбінації ядер на вибраному пристрої. При наявності 4 ядер, планувальник потоків ОС автоматично буде

використовувати їх всі, намагаючись отримати максимальну вигоду від багатоядерності процесора (надалі – CPU). В такому випадку *ProcessorAffinity* дорівнює 15 та визначається за формулою:

$$ProcessorAffinity=2^n-1, \quad (5.1)$$

де n – кількість ядер багатоядерного процесора, у тесті $n=4$.

Слід зазначити, що при розробленні програмних застосунків рекомендується уникати використання для обчислень ядра, на якому операційна система виконує передачу даних, очищення пам'яті та інші системні процеси. Зазвичай всі такі процеси обмежені першим ядром процесора. Таким чином, виключення першого ядра з обчислювальної задачі може привести до підвищення продуктивності застосунків. Тому для бенчмаркінгу доцільно обрати ядра з 2-го по 4-те та присвоїти нову бітову маску, отримавши значення 14 (рис. 5.1).



```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Total # of processors: 4
Current processors affinity: 15
*****
Insert selected processors, separated by comma (first CPU index is 1):
2,3,4
*****
Processor #2 was selected for affinity.
Processor #3 was selected for affinity.
Processor #4 was selected for affinity.
*****
Current processor affinity is 14
Для продовження натисніть будь-яку клавішу...

```

Рисунок 5.1 – Значення властивості *ProcessorAffinity* при використанні 4 ядер та ядер з 2-го по 4-те

Відповідно, для кожного з чотирьох ядер 4-ядерного процесора значення *ProcessorAffinity* будуть такими:

- 1) для 1-го ядра *ProcessorAffinity*=1;
- 2) для 2-го ядра *ProcessorAffinity*=2;
- 3) для 3-го ядра *ProcessorAffinity*=4;
- 4) для 4-го ядра *ProcessorAffinity*=8.

Треба зауважити, що більш корисним буде прив'язуватись не до ядер процесорів, а використовувати прив'язку до потоків, але цей шлях містить багато труднощів. Справа в тому, що Intel намагається полегшити роботу програміста, взявши прив'язку потоків до ядер на себе [52]. Очевидно, це має сенс, бо більшість великих компаній розробляють продукцію для масового користувача, для якого розуміння і використання власної паралелізації не є необхідним.

Для високої математичної продуктивності можна використовувати бібліотеку готових компонентів для програмування застосунків на мовах C/C++ та Fortran – Intel Math Kernel Library (MKL) [90]. Для швидкої роботи циклу доцільно включити автопаралелізацію в компіляторі від фірми Intel, а саме в Intel C++ Compiler (ICC) [52]. Для максимального використання кешу включають підтримку технології Hyper-Threading. Хоча наявність такої технології є хорошим маркетинговим рішенням, однак, для тих, кому все-таки потрібно визначати паралелізацію вручну, це ставить на шляху певні перешкоди. Можливо власноруч встановити власну прив'язку потоків до ядер, однак бібліотека Intel зведе їх нанівець.

У досліджуваному випадку додаткові труднощі виникають через те, що потік .NET, яким керує загальнономвне виконуюче середовище Common Language Runtime (CLR), не відповідає потоку ОС, а прив'язувати до ядер можна виключно потоки операційної системи [71, 159]. Щоб вирішити цю проблему, можна скористатися наведеними методами класу *Thread*:

```
Thread.BeginThreadAffinity();
...
Thread.EndThreadAffinity().
```

В такому разі код між наведеними викликами виконується на єдиному потоці ОС, що суттєво послаблює менеджмент потоків CLR.

Отримати ОС-потоки застосунку .NET можна, використовуючи *Process.GetCurrentProcess().Threads* – колекцію поточкових об'єктів [224]. Для запуску потоків на вибраних ядрах необхідно розробити клас *DistributedThread*, за допомогою якого здійснюється інкапсуляція звичайного Thread-об'єкта,

обмеження його діючим потоком ОС та установка бажаної прив'язки до ядра:

Для визначення найбільш ефективного алгоритму розподілення завдань між ядрами було розроблено чотири проекти, перший з яких (Проект № 1) імітує роботу автопланувальника ОС Windows, який намагається рівномірно розподілити завдання між апаратно наявними 4 ядрами одного процесора. Цей Проект № 1 є бенчмарком (еталонним тестом) для співвідносної оцінки інших проектів за критеріями: час виконання завдань (с), енергоспоживання (Вт), температура (°C) та відсоткове навантаження процесора з урахуванням фонових завдань ОС.

Кожен з проектів виконувався з дотриманням таких умов:

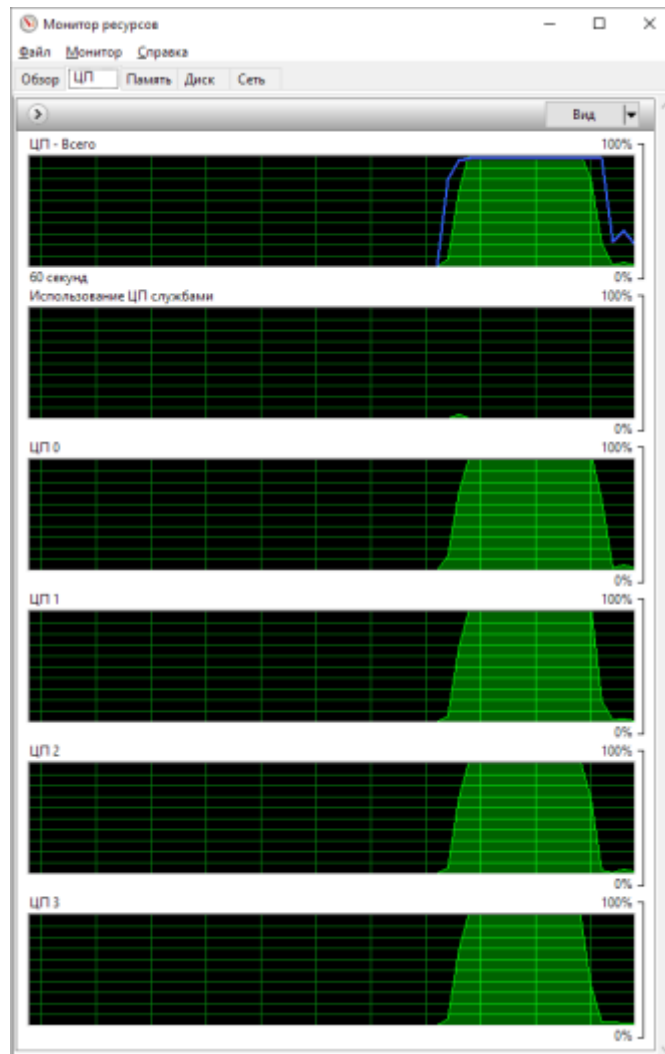
1. Підтримка технології Hyper-Threading відключена.
2. Утиліта HWMonitor активна.
3. Проекти запускаються по чергово при однаковій кількості фонових задач.

Зміст проектів та результати їх виконання наведені на рис. 5.4 – рис. 5.7 та зведені у табл. 5.1.

У Проекті № 1 виконане імітаційне моделювання роботи автопланувальника ОС: створено 4 паралельних потоки по 150 ітерацій на ядрах з 1-го по 4-те (рис. 5.4, а), зважаючи на те, що автопланувальник намагатиметься рівномірно навантажити кожне з чотирьох ядер (рис. 5.4, б).



a)



б)

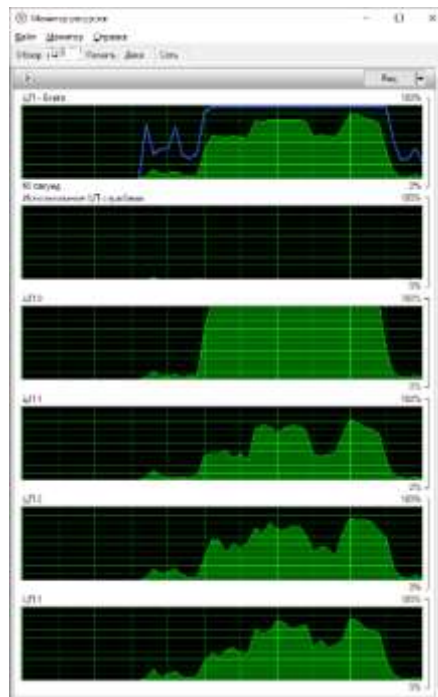
Рисунок 5.4 – Використання CPU за Проектом № 1: а – блок-схема;

б – осцилограма

За Проектом № 2 створюються два паралельних потоки (розподіл між кластерами за технологією `big.LITTLE`): 300 ітерацій на 1-му ядрі та 300 ітерацій, розподілених між 2–4-им ядрами (рис. 5.5, а). Другий потік розділяється автопланувальником ОС Windows на три цикли по X_i ітерацій у кожному так, що: $X_2 + X_3 + X_4 = 300$. Точні значення X_i не визначені, так як невідомо, як саме автопланувальник ОС поділить потік між трьома ядрами. Але, з моніторингових даних на рис. 5.4, б видно, що автопланувальник ОС намагається рівномірно навантажити ядра з 2-го по 4-те. Таким чином, підтверджуються алгоритм, реалізований у Проекті № 1 для імітації дій автопланувальника ОС з розподілу завдань між ядрами процесора.



а)

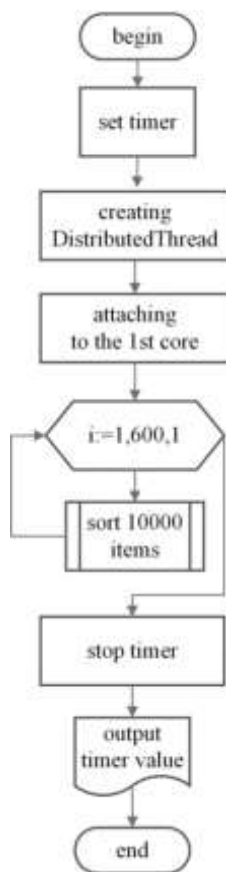


б)

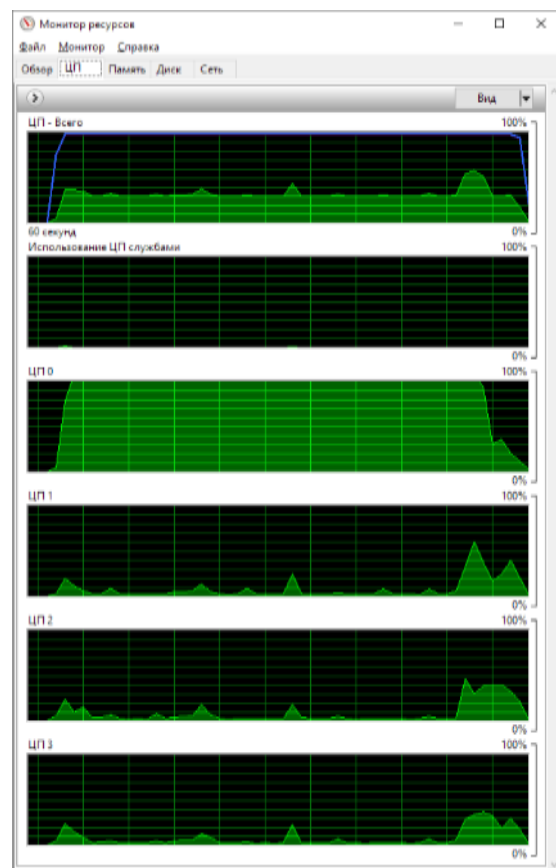
Рисунок 5.5 – Використання CPU за Проектом № 2: а – блок-схема;

б – осцилограма

У Проекті № 3 реалізований алгоритм, за яким створений один послідовний потік з 600 ітерацій на 1-му ядрі (рис. 5.6). Аналіз результатів цього алгоритму є важливим, тому що в 4-ядерних однокристальних процесорах, на базі яких побудовані обчислювальні системи БПЛА (найчастіше це різні моделі процесорів ARM Cortex), немає підтримки технології віртуальної багатопотоковості Hyper-Threading, як у процесорів компанії Intel. Тому, якщо не розділяти завдання на потоки, як запропоновано в цій роботі, то, наприклад, для процесора ARM Cortex A9 можливо у режимі Asymmetric Multiprocessing (AMP) отримати все навантаження на 1-ше ядро (рис. 5.6, а) [2]. Тоді час виконання завдання за Проектом № 3 зросте майже втричі у порівнянні з бенчмарком Проекту № 1 (табл. 5.1).



а)

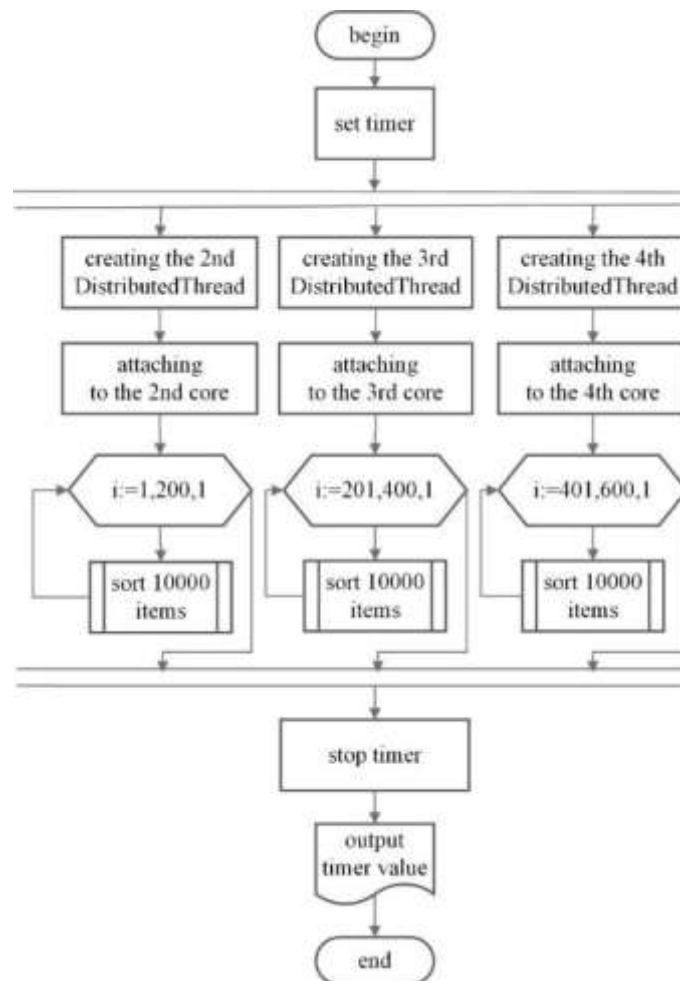


б)

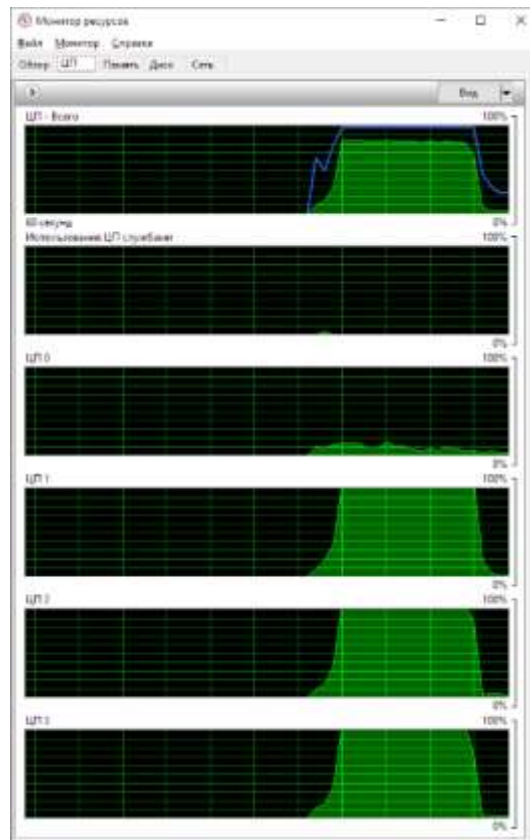
Рисунок 5.6 – Використання CPU за Проектом № 3: а – блок-схема;

б – осцилограма

У Проекті № 4 реалізовано алгоритм, згідно з яким 1-ше ядро не задіяне, а до 2–4-го ядер зроблена прив'язка 3 паралельних потоків по 200 ітерацій кожен (рис. 5.7, а). Але, за моніторингом ресурсів на 1-му ядрі все ж зареєстрована активність, що можна пояснити обробкою фонових процесів ОС (рис. 5.7, б). Саме тому, запропонований алгоритм ручної прив'язки тестового завдання на 2–4-те ядра можна вважати найбільш ефективним. В такому разі, розвантажене 1-ше ядро найшвидшим чином зможе відпрацювати завдання, пов'язані з критичним застосуванням БПЛА. Наприклад, це коригування маршруту при появі механічної перешкоди на шляху БПЛА, перехід на оптичну навігацію при неможливості отримання GPS-координат тощо. У якості тестового завдання Проекту № 4 в такому разі можна розглядати компресію отриманого відеопотоку, підготовку даних для передачі за допомогою модуля зв'язку з БПЛА до наземного КЦ або до головного дрона.



a)



б)

Рисунок 5.7 – Використання CPU за Проектом № 4: а – блок-схема;

б – осцилограма

Таблиця 5.1 – Результати бенчмаркінгу за чотирма проектами

Показник	Проект № 1	Проект № 2	Проект № 3	Проект № 4	Використане ПЗ
Час виконання завдання (Average Time), с	12,7	24,6	47,2	16,5	Власна розробка
Енергоспоживання (Average Power), Вт	58,5	38,9	27,3	49,3	HWMonitor v.1.33.0
Температура (Temperature), °C	75	62	62	80	HWMonitor v.1.33.0
Використання CPU (Utilization), %	100	56	31	77	HWMonitor v.1.33.0
Кількість обертів кулера на процесорі (Fan's number of rotations), RPM	1900	1560	1505	1599	HWMonitor v.1.33.0

При бенчмаркінгу можлива розбіжність показників, яка обумовлена тим, що програми моніторингу зчитують показання датчиків раз на 2, 3 або 5 с. Це може не збігатися з часом виконання завдань проектів, що тестуються.

За даними моніторингу ресурсів (табл. 5.1), отриманими тестувальником HWMonitor, вдалося суттєво знизити температуру на 1-му ядрі шляхом ручного перерозподілу завдання між ядрами процесора за Проектом № 4 (рис. 5.8) майже на 13 % у порівнянні з усіма іншими проектами. Завдяки цьому при запуску нового фоновому процесу ОС, який може бути пов'язаним з критичним застосуванням БПЛА (втрата GPS-координат, включення задачі оптичної навігації, миттєвий перерахунок курсу за причини пориву вітру й т. і.), значно підвищується ефективність використання КС.

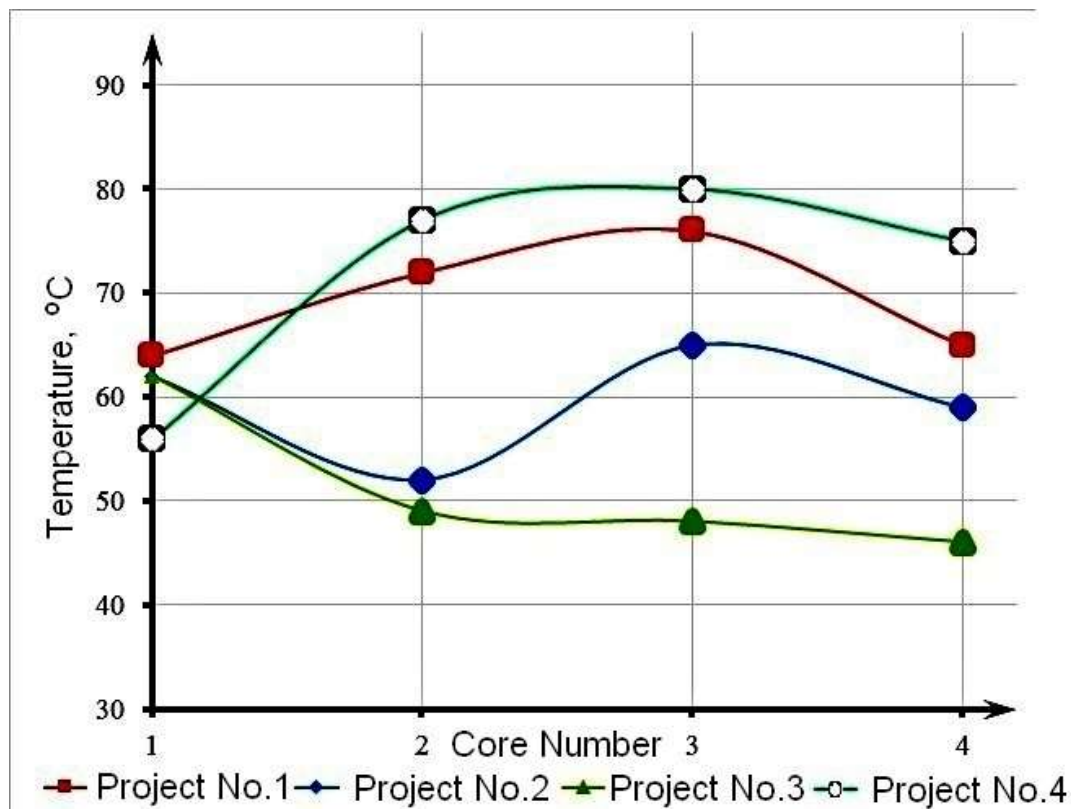


Рисунок 5.8 – Температура однокристального процесора з деталізацією по ядрах

Нижче представлена діаграма, що наочно демонструє підвищення споживаної енергії в залежності від кількості задіяних ядер (рис. 5.9).

Підхід з використанням 4 потоків є найбільш ефективним за часом виконання завдань, однак, він також є найменш енергозберігаючим. Тому

найбільш ефективно використання обчислювальних ресурсів БПЛА забезпечить розподіл згідно з алгоритмом Проекту № 4 завдань, не пов'язаних з навігацією та з управлінням дроном.

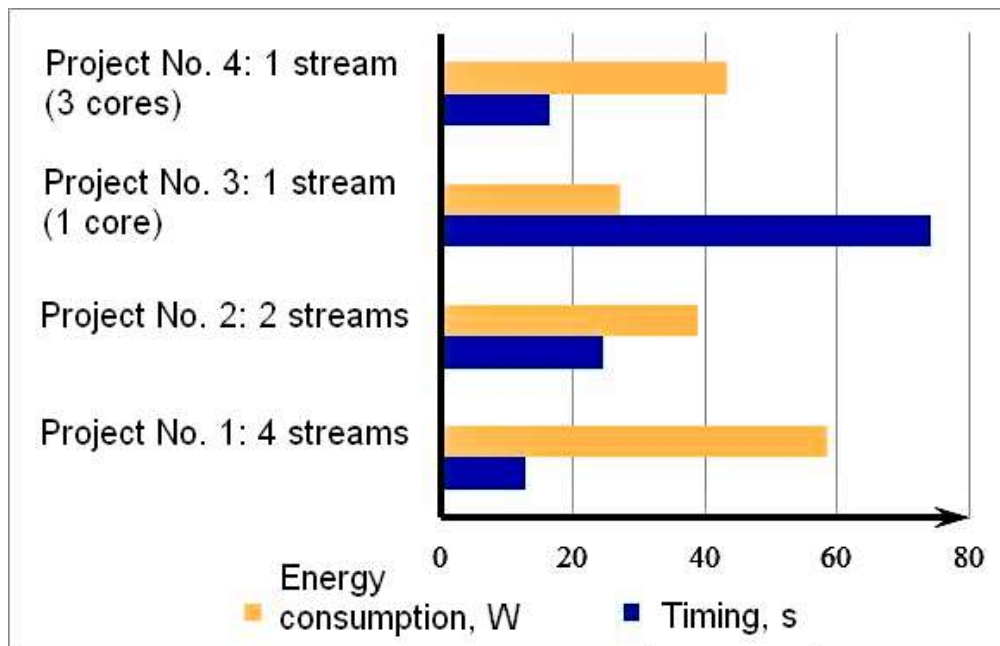


Рисунок 5.9 – Енергоспоживання в однокристальному обчислювальному процесорі в залежності від кількості навантажених потоків

В результаті аналізу механізму роботи автоматичних планувальників завдань ОС з'ясовано, що в зазначених умовах здійснюється розподіл процесів між усіма чотирма ядрами CPU. Але, в такому разі 1-ше ядро не має резервів у порівнянні з іншими ядрами по навантаженості (навантажене на 100 %) та температурі (є на рівні з іншими задіяними ядрами). Кількість обертів кулера та енергоспоживання процесора в режимі автопланування є найвищим. Тому, при виникненні критичної ситуації, коли необхідним може бути суттєве збільшення обчислювань на 1-му ядрі для задач системи управління БПЛА, такі задачі можуть стояти у черзі за попередньо запущеними завданнями. З точки зору життєзабезпечення БПЛА це є неприпустимим.

Дослідження показали, що розпаралелювання завдань, які можуть бути виконані як багатопоточні (компресія відеопотоку, передача даних різними каналами зв'язку та ін.), підвищує ефективність використання БПЛА. Прив'язка

процесів до трьох ядер замість чотирьох практично на 30 % збільшує загальний час виконання завдання у порівнянні з часом виконання аналогічного завдання за стандартним планувальником завдань ОС (іноді званим «говернором»), але на 15,7 % зменшує енергоспоживання процесора.

5.1.2 Алгоритм енергоефективної роботи модулів ШГКМ з диспетчеризацією завдань

При розробленні математичної моделі диспетчеризації завдань між обчислювачами об'єктів ШГКМ з обмеженими енергоресурсами необхідно враховувати, що інноваційні технології, які з'явилися в останні роки та пов'язані з отриманням, накопиченням, передаванням енергії бездротовим способом, мають на увазі досить обмежений рівень потужності. Хоча такої потужності і достатньо для живлення обчислювальних модулів БПЛА, але все ж питання енергоефективності обчислень мобільних пристроїв залишається актуальним, тому що кількість функцій БПЛА зростає за рахунок різноманітності вимірюваних величин, ускладнення задач фотозйомки у різних умовах. Це підвищує й навантаження обчислювача, й витрати на електроживлення додаткових модулів. Зменшення споживання енергії є найважливішим завданням при розробленні та використанні сучасних процесорів. Підвищення ефективності роботи обчислювачів пов'язана з вирішенням цілого ряду завдань, які дозволяють підвищити їх економічну ефективність на основі методів покращення енергоживлення. Це питання є доволі актуальним саме для обчислювачів БПЛА, коли перехід в енергозберігаючий режим здатне значно підвищити час польоту.

Один з механізмів економії електроенергії полягає в тому, що коли система знаходиться в режимі очікування, вона може бути в певний момент переведена в малопотужний стан споживання енергії (стан сну) [103]. Але при цьому проблемою є те, що зворотній перехід зі стану сну в активний режим вимагає додаткових витрат енергії.

У загальних принципах та сучасних апаратних рішеннях для підвищення енергоефективності комп'ютерів передбачено планування розподілу завдань по

вузлах і управління чергою може бути джерелом значної додаткової економії електроенергії [246].

Тому доцільно сформулювати і реалізувати новий алгоритм енергоефективної роботи модулів ШГКМ з диспетчеризацією завдань та з використанням стану сну модулів.

Розглянутий підхід змушує дещо змінити існуючу математичну модель процесу диспетчеризації завдань з переведенням системи у малопотужний стан споживання електроенергії, яка була запропонована у роботі [168] та мала вигляд (5.2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot t_{ij} \rightarrow \min \quad \vee \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot t_{ij} \leq t_{\text{lim}}, \\ V_i^{\text{RAM}} \leq x_{ij} \cdot V_{ij}^{\text{RAM}}, \\ (x_{ij} \cdot W_{ij}^{\text{нак}}) \rightarrow \max, \quad W_{ij}^{\text{нак}} > 0, \\ W_{ij}^{\text{мод}} \leq W_j^{\text{нак}} + W_{ij}^{\text{поступ}}. \end{array} \right. \quad (5.2)$$

де t_{ij} – час завершення i -го завдання на j -му модулі;

V_{ij}^{RAM} – обсяг оперативної пам'яті j -го модуля для виконання i -го завдання;

$W^{\text{мод}}$ – енергоспоживання модуля (загальна енергія, споживана віддаленим модулем об'єкта ШГКМ);

W^{acc} – накопичена енергія (accumulated);

W^{rec} – енергія, що надійшла (received);

x_{ij} – елемент матриці розподілу завдань, який може приймати такі значення

(5.3):

$$\left. \begin{array}{l} \{x_{ij} = 0, i\text{-th task isn't appoined to } j\text{-th module,}\} \\ \{x_{ij} = 1, i\text{-th task is appoined to } j\text{-th module.}\} \end{array} \right\} \quad (5.3)$$

Зазначена модель потребує розвитку, має бути розширеною наведеними нижче залежностями (5.4) та не передбачати режиму сну окремих ядер під час виконання завдання. За модифікованим підходом j означає номер ядра CPU на однокристальному q -му процесорі з n ядрами. Енергія, акумульована під час виконання i -го завдання, яка надійшла до q -го процесора від PD –поліметричних датчиків або від іншого КФО:

$$W_{iq}^{acc}(t_i) = \sum_{pd=1}^{PD} W_{pd}^{rec} \rightarrow \max, W_{iq}^{mod} \quad (5.4)$$

де $q = 1, \dots, z$ (z – кількість КФО у ШГКМ).

Тоді модернізована математична модель диспетчеризації завдань між ядрами однокристального процесора набуває такого вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{iq}^{acc}(t_i) = \sum_{pd=1}^{PD} W_{pd}^{rec} \rightarrow \max, W_{iq}^{mod} \\ (x_{ij} W_{iq}^{acc}) \rightarrow \max, W_{iq}^{acc} \geq W_{iq}^{mod} \\ x_{ij} = 0, i\text{-th task isn't appoined to } j\text{-th CPU core,} \\ x_{ij} = 1, i\text{-th task is appoined to } j\text{-th CPU core.} \end{array} \right\} \quad (5.5)$$

Однією з відомих технологій для зниження споживання (або покращення енергоживлення) енергії є динамічне масштабування швидкості (напруги і частоти, DVFS Scheduling Algorithms) процесора, при використанні якої процесор може варіювати швидкість динамічно. Використовується виробниками процесорів як для десктопних систем (Intel, AMD і IBM) так і процесорів для мобільних пристроїв.

Традиційні рішення, використані вендорами однокристальних обчислювачів для мобільних систем, передбачають виконання різних завдань на різних, спеціалізованих за типами завдань, типах процесорів та ядер. З метою

балансування навантаження багатоядерного процесора зроблена спроба розробити математичну модель та алгоритми її реалізації з використанням одних і тих же ядер для виконання різних завдань.

Високі швидкості виконання завдань призводять до високої продуктивності, але при цьому має місце і високе споживання енергії. Саме тому у багатоядерних системах доцільно здійснювати динамічне масштабування швидкості при зменшенні середнього коефіцієнту навантаження $u_{k,i}$ процесора. При цьому обчислення не виконуються за найшвидші терміни при максимальному навантаженні процесора, а швидкість процесора S регулюється на підставі поточного навантаження процесора і обмежень продуктивності. Можна показати, що оптимізація енергоспоживання має місце у випадку, якщо всі завдання, подані на рішення на процесор за певний проміжок часу $e_{k,i}$, виконуються в директивні терміни $d_{k,i}$, тобто без запізнювання.

Серед мікропроцесорів, що працюють із змінною швидкістю, можна назвати процесори Qualcomm Snapdragon.

Математичні моделі та алгоритм розподілу завдань для багатоядерних систем однокристальних процесорів можуть бути побудовані шляхом модифікації методів розподілу завдань між процесорами однорідних і неоднорідних обчислювальних кластерів [330]. Базова математична модель виглядає таким чином:

$$\begin{aligned}
 P_k \sim S_k^3 T_k &= \{t_{k,j}(e_{k,i}, d_{k,i}), i = 1, \dots, n_k\}, \\
 d_{k,i} &\leq d_{k,i+1}, \\
 u_{k,i} &= \frac{\sum_{j=1}^i e_{k,j}}{d_{k,i}}, \\
 S_k &= \max_{i=1}^{n_k} \{u_{k,i}\}, \\
 v_k &= \min_{i=1}^m \{S_i \geq S_k\}, \\
 u_{k,i} &= \frac{\sum_{j=1}^i e_{k,j}}{d_{k,i} - r_{k,i}},
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

де P_k — потужність, споживана процесором;

S_k — швидкість процесора;

T_k – безліч незалежно виконуваних завдань;

v_k – поточна напруга процесора;

V_i – режим роботи процесора;

$u_{k,i}$ – поточний коефіцієнт використання (сума тривалостей завдань, загальне навантаження, віднесена до директивного терміну завершення останнього завдання).

Для порівняльного аналізу базового алгоритму та модифікованого алгоритму розглянемо набір завдань T_k , де їх характеристики представлені в табл. 5.1, осцилограми – на рис. 5.10, а. У базовому методі [296] співставлені режими роботи процесора (4 рівня) і відповідні відносні швидкості (частоти) процесора.

Але для однокристальних систем програмним шляхом неможливо вибрати режим роботи процесора мобільного пристрою на відміну від десктопної версії, для якої були створені вищеописані алгоритми. Тому перспективним є використання іншого підходу до масштабування швидкості, а саме – ефективне навантаження ядер процесора для зменшення енергозатрат об'єкта. Тому з базової моделі [296] виключене поняття режиму роботи процесора.

Частково використовуючи в межах аналогії, яка може бути використана між багатопроцесорними та багатоядерними комп'ютерними системами, алгоритми диспетчеризації завдань багатопроцесорних систем, наведені в [168, 330], опишемо етапи модифікованого алгоритму розподілу завдань між ядрами однокристального процесора, який може бути використаний у мобільних об'єктах ШГКМ.

На першому етапі всі завдання об'єкту (розрахунок рівня накопиченої вимірювальної енергії поліметричних датчиків, обробка вимірних фізичних величин, обробка аудіо- та відео- матеріалів тощо) сортуються в порядку убутання (не зростання) їх директивних термінів.

На другому етапі відсортовані завдання розподіляються таким чином, що одне завдання розподіляється лише на одне ядро.

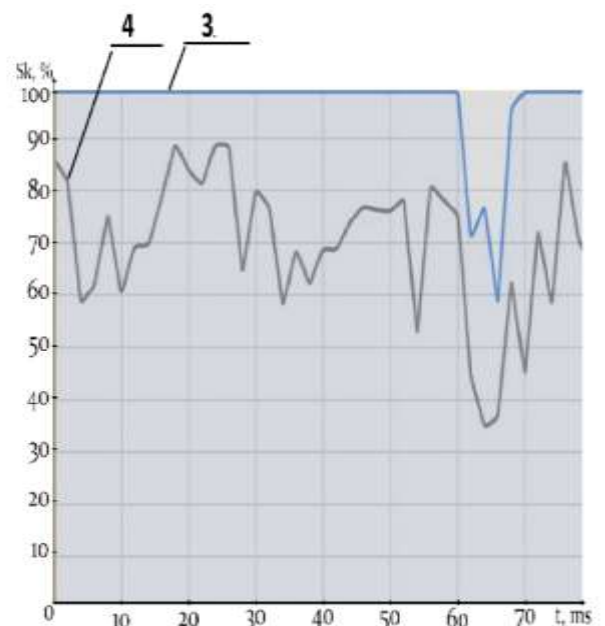
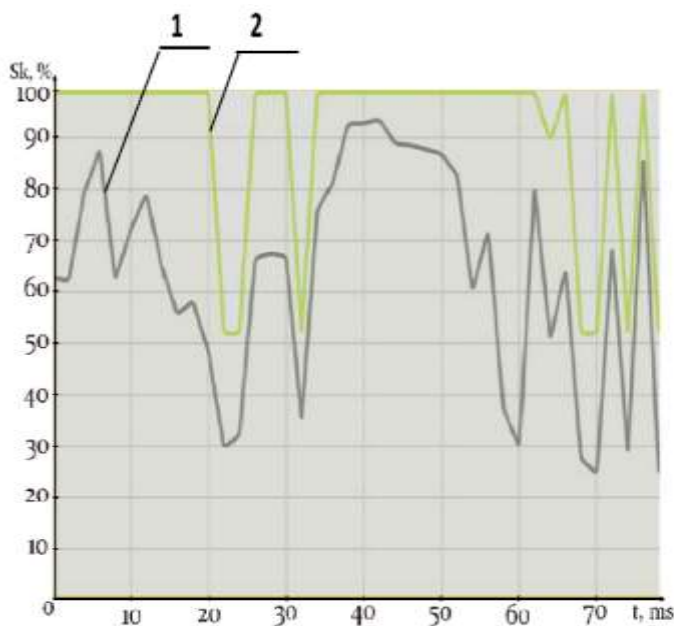
На третьому етапі всі ядра упорядковуються за рівнем їх поточного навантаження.

На четвертому етапі перевіряється достатність рівня енергії для початку обчислень.

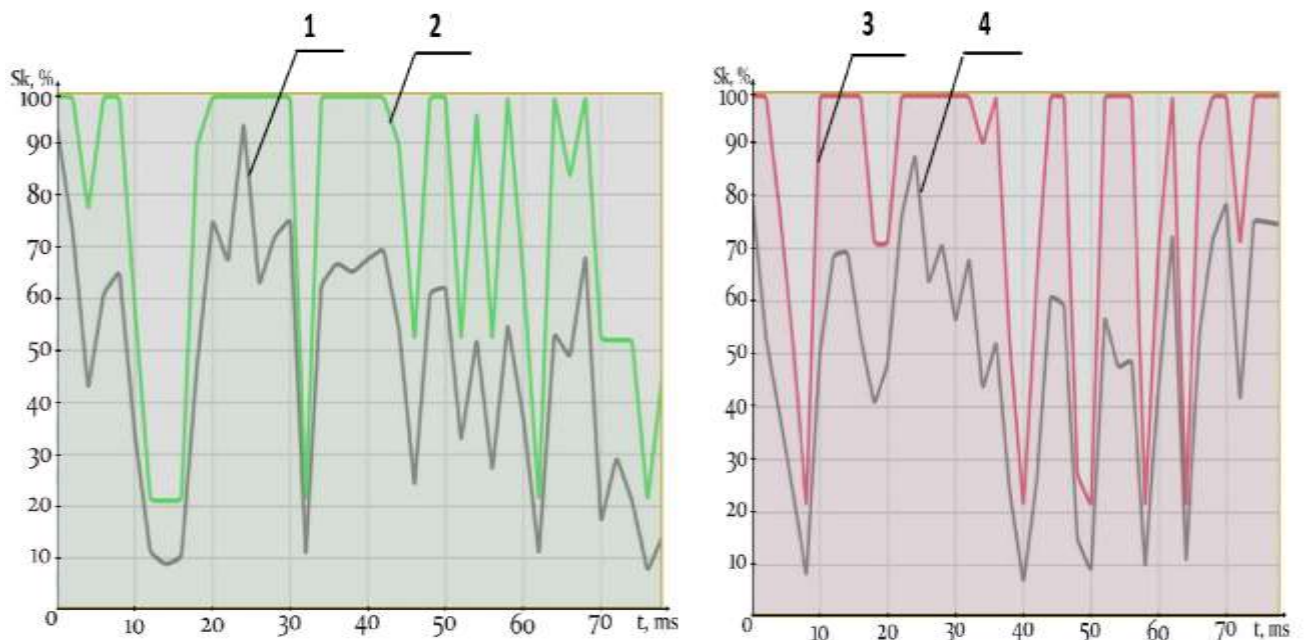
На п'ятому етапі перше з нерозподілених завдань розподіляється на ядро, що має найменший рівень навантаження на момент розподілу, другий з решти – на ядро, наступне за ним по рівню навантаження і т. д. до тих пір, поки не будуть рівномірно навантажені всі ядра.

Процедура повторюється до тих пір, поки всі завдання вихідної множини не будуть розподілені по ядрах процесора, рівень акумульованої енергії не досягне необхідного до початку функціонування модулю.

Запропонований алгоритм розподілу завдань по ядрах не передбачає відключення та простою будь-якого з ядер CPU, що забезпечить економію енергії, яка б витрачалась на повторне включення ядра. Такий підхід дозволяє забезпечити найбільш ефективно навантаження процесора, виконати всі завдання без черги та запізнювання. Алгоритм було протестовано на процесорі Qualcomm Snapdragon 400, 4 ядра Krait (1,7 ГГц), на якому базується Microsoft Lumia 640 під ОС Windows Phone 8.1 (рис. 5.10, б).



а)



б)

Рисунок 5.10 – Навантаження у часі 1-го – 4-го ядер CPU перед (а) та після (б) застосування алгоритму диспетчеризації завдань





В табл. 5.2 і табл. 5.3 наведені узагальнені експериментальні дані щодо часових показників (Timeline) навантаження процесора в розрізі ядер. Розраховані та графічно відображені середні показники навантаження кожного з 4 ядер. Обчислений коефіцієнт навантаження k_i процесора при використанні алгоритму диспетчеризації завдань та без нього.

Таблиця 5.2 – Навантаження CPU в розрізі ядер без планування завдань

№ ядра CPU	Навантаження CPU у розрізі часу, %								Середній коефіцієнт навантаженості
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Ядро 1	70	50	65	95	85	30	50	64	
Ядро 2	100	90	85	100	100	100	25	86	
Ядро 3	100	100	100	100	100	100	100	100	
Ядро 4	60	85	80	70	75	75	45	70	

$$u_{k,i} = 0,78$$

Таблиця 5.3 – Навантаження CPU в розрізі ядер з використанням планувальника завдань

№ ядра CPU	Навантаження CPU у розрізі часу, %							Середній коефіцієнт навантаженості
Ядро 1	65	70	10	65	60	30	20	46 
Ядро 2	70	100	100	100	90	50	50	80 
Ядро 3	25	70	100	20	20	20	100	51 
Ядро 4	10	40	60	10	10	10	60	29 

$$u_{k,i} = 0,51$$

В результаті проведених досліджень на математичній моделі із застосуванням алгоритму розподілу завдань між 4 ядрами Cortex-A7 (1,2 ГГц) процесора Qualcomm MSM8926 Snapdragon 400 було доведено, що використання запропонованого алгоритму дозволяє зменшити коефіцієнт навантаженості CPU на 23 %. У такому разі загальне енергоспоживання об'єктами ШГKM, де використовуються такі процесори, теж суттєво зменшиться. Ще більшої актуальності рішення набуває при зростанні кількості ядер в процесорах сучасних мобільних пристроїв (8 ядер 64-bit в Oukitel K6000 PRO Gray, MTK 6592 від MediaTek, Snapdragon 616 та 810 від Qualcomm та ін.) й можливістю розгону ядер до частоти 2,2–2,4 ГГц.

Подальший розвиток принципів подовження часу енергонезалежності модулів ШГKM може збільшити ефективність віддаленого управління безпілотними КС з ушкодженими функційними модулями. Такий підхід дозволить вирішувати деякі технічні проблеми безпілотних КС без зупинення каравану (або зграї, тобто сукупності всіх елементів ШГKM) та без направлення у зону його поточного місцезнаходження комплексних ремонтних бригад завдяки деталізації проблем та визначення фахової спрямованості необхідних відряджуваних спеціалістів, що в умовах військових дій збереже життя військових та цивільних фахівців.

Досягнення балансу між високою продуктивністю і тривалим часом автономної роботи – важливе завдання при розробленні принципів роботи ШГКМ. Подальшого успіху в цьому напрямку можна досягнути із застосуванням технології гетерогенних обчислень. Ця теорія заснована на розподіленні навантаження за різними функціональними ядрами різних процесорів однокристальних плат – CPU, GPU, DSP. Обчислювально-інтенсивні операції з CPU повинні передаватись на виконання в DSP (наприклад, мультимедійні операції над звуком та зображеннями), який справляється з ними куди ефективніше. За попередніми обчисленнями створення алгоритмів одночасного використання CPU і GPU в однокристальних системах Snapdragon дозволить знизити рівень енергоспоживання до 40 %.

Таким чином, алгоритмічна підтримка гетерогенних обчислень (коли використовуються можливості і багатоядерних CPU, і спеціалізованих DSP або GPU одночасно) здатна забезпечити необхідну гнучкість і підвищити продуктивність мобільної однокристальної системи при зниженні енергоспоживання і тепловиділення.

5.2 Віддалене управління енергоспоживанням неперіоритетних пристроїв на борту БПЛА з обмеженими енергоресурсами

Актуальним є питання збільшення часу функціонування суб-роїв БПЛА в польоті без збільшення ваги автономних джерел електроживлення на борту БПЛА.

Треба зазначити, що максимальний час польоту БПЛА обмежується не лише технічними характеристиками встановлених акумуляторних батарей, але й інтенсивністю енергоспоживання комп'ютерними компонентами на борту БПЛА. Ситуація ускладнюється, коли БПЛА виконує не суто особисте завдання, а діє у складі зграї, що потребує додаткових витрат енергії на спілкування членів такої зграї між собою та координації групового руху.

Можна припустити, що певного прогресу в економії обмежених енергоресурсів БПЛА при взаємодії між комп'ютерними компонентами

головного БПЛА (БПЛА–Г) та підпорядкованих (БПЛА–П) можна досягнути встановленням з'єднання та обміну інформацією безпосередньо між пристроями, без зовнішнього втручання їх власника (наземного КЦ).

Перевищення нормативного енергоспоживання може спричинити критичну ситуацію для рухомих об'єктів – падіння або вимушену посадку на чужій території.

Для запобігання критичним ситуаціям необхідно, по-перше, логічно розділити пристрої, що живляться від електричної системи обмеженої потужності, на пріоритетні та непріоритетні. По-друге, доцільно розробити метод управління відключенням непріоритетного навантаження від джерела електроживлення [265].

Суттєву частку енергії автономного джерела електроживлення БПЛА споживає його ЕОС.

Наприклад, на обслуговування електронного устаткування БПЛА RQ-4 Global Hawk, який за класифікацією дронів належить до великих або до 3-го класу [360, 385], витрачається 6 кВт електроенергії при загальній потужності генераторної установки 30–90 кВт [164, 238].

А тільки одна 2–20 мегапіксельна камера на базі CMOS-матрицею з роздільністю 1К–4К на борту малого БПЛА 1-го класу (DJI Phantom, Blade Chroma, Yuneec Typhoon, Walkera QR й т. п.) потребує на 30 хв польоту від 5 до 9 Вт при енергії літій-полімерного акумулятора біля 90 Вт•год [54, 110, 147].

Тобто, незалежно від розміру та ваги БПЛА, його ЕОС споживає від 7 до 20 % заряду акумуляторної батареї. Тому доцільно розробити метод управління підключенням компонентів ЕОС до автономного джерела обмеженої потужності, який буде ефективним для всіх класів БПЛА.

Безперечно, обчислювач БПЛА (CPU), датчики запобігання зіткненням (ДЗ) та СУ двигунами мають бути постійно підключені до автономного джерела електроживлення БПЛА. Тому в дослідженнях для зменшення енергоспоживання пропонують відключення передавачів БПЛА, коли немає необхідності в передаванні інформації [244].

Але саме формулювання «немає необхідності» може стати причиною виникнення критичної ситуації, якщо під час відключення модуля зв'язку (МЗ) на дроні, з наземного КЦ на дрон передаються зміни маршруту або погодних умов, інформація про несподівані перешкоди тощо.

Зважаючи на висловлене, в новому українському БПЛА «Лелека» реалізований режим, коли приймач на борту включений постійно, а передавач дистанційного включається та відключається наземним оператором [305].

Такий підхід суттєво покращує ситуацію взаємодії наземних операторів з поодинокими БПЛА, але є неприйнятним при організації їх у зграю, розмір якої, з урахуванням світового досвіду, може становити від 119 (за технологією «інтелектуального рою») до 1500 (з централізованим управлінням) дронів у зграї [89, 312].

Таким чином, було з'ясовано, що немає наявних методів та засобів економії ресурсу автономного джерела енергії на БПЛА, завдяки яким можливо було б суттєво збільшити час польоту зграї дронів за рахунок алгоритмізованого почергового підключення компонентів БПЛА до електроживлення.

Для розроблення методу та засобів бездротового управління почерговим підключенням пристроїв головного та підпорядкованих БПЛА зграї до джерела електроживлення обмеженої потужності на борту кожного БПЛА необхідно:

- побудувати блок-схему алгоритму, що реалізує запропонований метод;
- розробити апаратне рішення для можливості відключення неперіоритетного пристрою через локальну бездротову мережу;
- розробити ПЗ, що дозволяє автоматизувати процес почергового підключення пристроїв до наявних джерел електроживлення обмеженої потужності.

В основу методу покладено те, що при виконанні моніторингових, рятувальних та ін. функцій з використанням зграї БПЛА у визначеній частині території доцільно використовувати відповідні пристрої лише одного апарату, який назвемо БПЛА-Г (рис. 5.11). В залежності від типу виконуваного завдання, в такому апараті будуть задіяні різні компоненти ЕОС, такі як цифрова камера

(ЦК), різноманітні датчики моніторингу ДМ-1...ДМ-Q або ін.

Зазначений БПЛА-Г буде головним вузлом утвореного кластера бездротової мережі, яка складається з усіх БПЛА зграї.

В розробленому методі формування кластерів відбувається таким чином:

Головні вузли кластера визначаються на КЦ з числа БПЛА, які мають найбільш енергоємний акумулятор.

Належність підпорядкованих вузлів даному кластеру визначаються головним БПЛА-Г такого кластера за результатами виявлення пристроями ЕОС головного БПЛА сусідніх БПЛА-П.

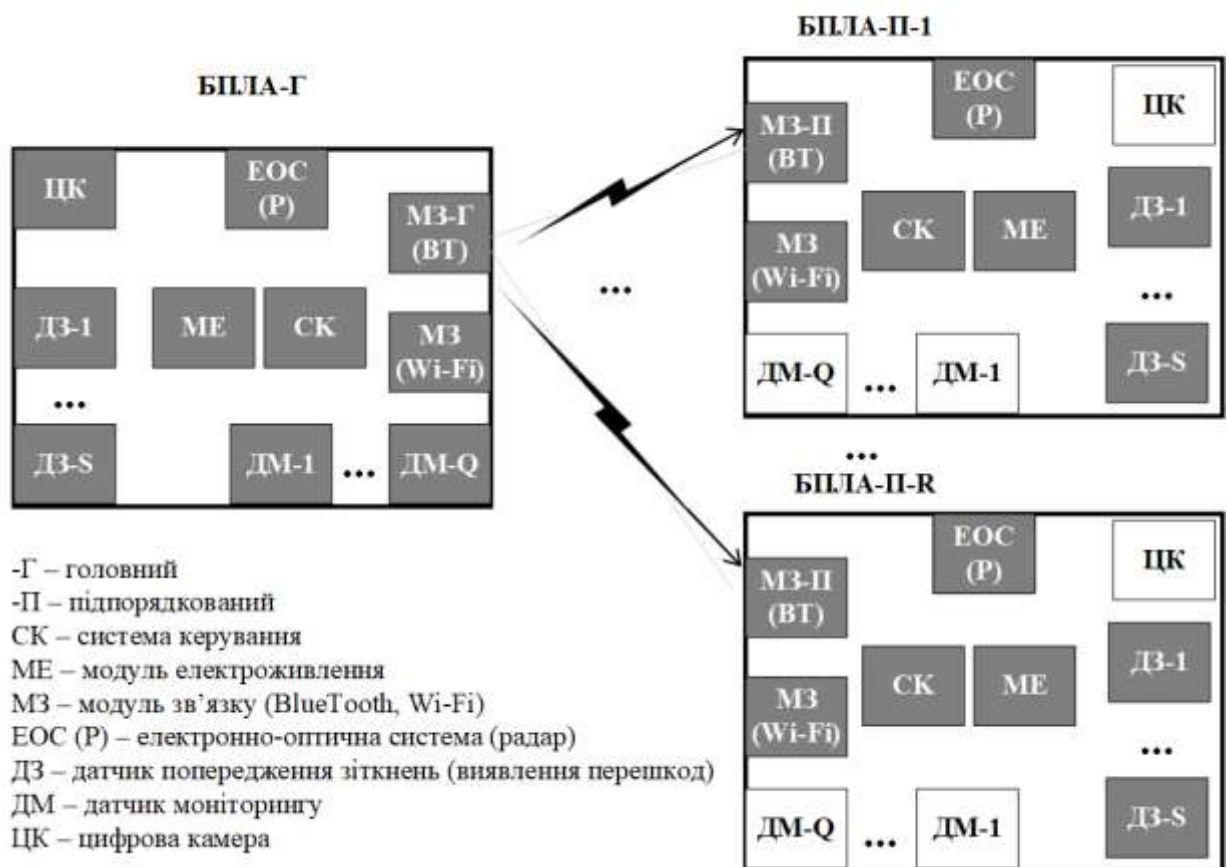


Рисунок 5.11 – Структурна схема взаємодії БПЛА в межах одного кластера з відключенням неперіоритетних пристроїв

Зважаючи на те, що функції, які виконуються БПЛА на сегменті території, достатньо жорстко прив'язані до GPS-координат, немає сенсу одночасно виконувати завдання з використанням аналогічних компонентів декількох БПЛА, які знаходяться один від одного на відстані, співмірній з похибкою GPS-

координат. На теперішній час похибка визначення GPS-координат трекерами, призначеними для цивільних БПЛА, складає $\delta_{\max} = 10 \dots 15$ м [356]. Точність для БПЛА 0-го та 1-го класів зростає лише при використанні двох або більше навігаційних систем (GPS, ГЛОНАСС та ін.) одночасно або завдяки спеціалізованим методам, розрахованим на обладнання відповідної вартості. В такому разі похибка зменшується до $\delta_{\min} = 4 \dots 10$ м.

Виходячи з цього, доцільно визначити пріоритетним пристроєм ЦК або ДМ, встановлені на борту БПЛА-Г. Тоді аналогічні пристрої на борту БПЛА-П-1...БПЛА-П-R (див. рис. 5.11) вважаються непріоритетними, їм треба надіслати сигнал на тимчасове відключення непріоритетного пристрою. Таким чином забезпечується економія заряду батареї БПЛА-П.

Або після закінчення виконання завдання пріоритетним блоком на борту БПЛА-Г, або у разі, якщо відстань до r -го БПЛА-П $d_r \rightarrow \delta$, і він має бути виключеним з p -го кластера, до такого БПЛА-П-R надсилається сигнал на включення непріоритетних пристроїв.

Відстань d_p між КЦ і головними вузлами БПЛА-Г кожного p -го кластера обчислюється з використанням арифметичної формули (5.7):

$$d_p = \sqrt{(\text{lat}_{\text{БПЛА-Г-Р}} - \text{lat}_{\text{КЦ}})^2 + (\text{lon}_{\text{БПЛА-Г-Р}} - \text{lon}_{\text{КЦ}})^2 + h_{\text{БПЛА-Г-Р}}^2}, \quad (5.7)$$

де $\text{lat}_{\text{БПЛА-Г-Р}}$, $\text{lon}_{\text{БПЛА-Г-Р}}$ та $h_{\text{БПЛА-Г-Р}}$ відповідно координати широти і довготи та висота польоту головного вузла (БПЛА-Г) p -го кластера;

$\text{lat}_{\text{КЦ}}$ та $\text{lon}_{\text{КЦ}}$ відповідно координати широти і довготи знаходження КЦ.

З формалізованого аналізу арифметичної формули (5.7) випливає, що в ній не наводиться логічна послідовність виконуваних арифметичних дій над аргументами. Тому, для однозначності подання таких дій, арифметичну формулу (5.7) запишемо у вигляді виразу (5.8):

$$d_p = \sqrt{\overbrace{\left((lat_{БПЛА-Г-Р} - lat_{КЦ})^2 \right)^2}_{\text{«Загальна структура функцій}^1\text{»}} + \overbrace{\left((lon_{БПЛА-Г-Р} - lon_{КЦ})^2 \right)^2}_{\text{«Загальна структура функцій}^2\text{»}} + h_{БПЛА-Г-Р}^2}_{\text{«Результуюча структура функцій»}}, \quad (5.8)$$

з якого випливає, що воно на попередньому етапі може бути записано у вигляді аналітичного виразу «Загальної структури функцій¹» (5.9):

$$\left. \begin{matrix} lat_{БПЛА-Г-Р} \rightarrow \\ lat_{КЦ} \rightarrow \end{matrix} \right\} f_1(\pm\Sigma) \rightarrow \langle\langle lat_{БПЛА-Г-Р} - lat_{КЦ} \rangle\rangle \rightarrow f_1(\Sigma_\Sigma) \rightarrow \langle\langle (lat_{БПЛА-Г-Р} - lat_{КЦ})^2 \rangle\rangle \uparrow \text{«Проміжний аргумент}^1\text{»}, \quad (5.9)$$

де $f_1(\pm\Sigma)$ – функціональна структура суматора, котра активізує різницевий аргумент « $(lat_{БПЛА-Г-Р} - lat_{КЦ})$ »;

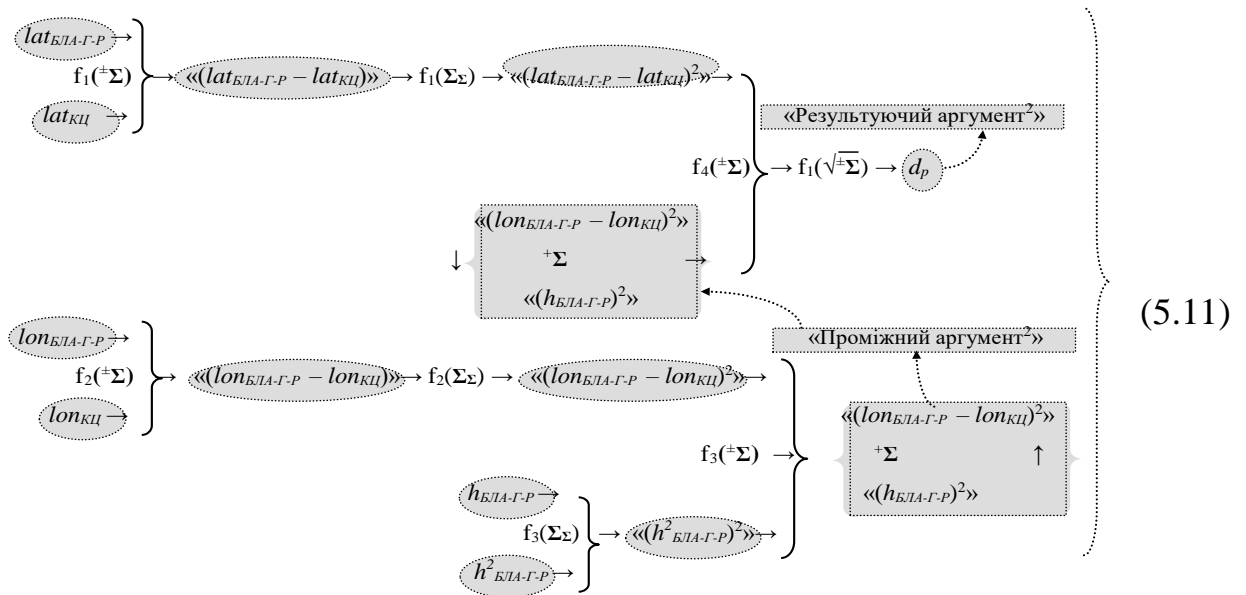
$f_1(\Sigma_\Sigma)$ – функціональна структура помножувача, котра активізує «Проміжний аргумент¹»,

та у вигляді аналітичного виразу «Загальної структури функцій²» (5.10):

$$\left. \begin{matrix} lon_{БПЛА-Г-Р} \rightarrow \\ lon_{КЦ} \rightarrow \end{matrix} \right\} f_2(\pm\Sigma) \rightarrow \langle\langle lon_{БПЛА-Г-Р} - lon_{КЦ} \rangle\rangle \rightarrow f_2(\Sigma_\Sigma) \rightarrow \langle\langle (lon_{БПЛА-Г-Р} - lon_{КЦ})^2 \rangle\rangle \rightarrow \left. \begin{matrix} \langle\langle (lon_{БПЛА-Г-Р} - lon_{КЦ})^2 \rangle\rangle \\ \uparrow \\ \langle\langle h_{БПЛА-Г-Р}^2 \rangle\rangle \end{matrix} \right\} \text{«Проміжний аргумент}^2\text{»} \quad (5.10)$$

$$\left. \begin{matrix} h_{БПЛА-Г-Р} \rightarrow \\ h_{БПЛА-Г-Р} \rightarrow \end{matrix} \right\} f_3(\Sigma_\Sigma) \rightarrow \langle\langle h_{БПЛА-Г-Р}^2 \rangle\rangle$$

Таким чином, «Результуючу структуру функцій» арифметичного виразу (5.8), з урахуванням аналітичних виразів (5.9) та (5.10), можливо записати у вигляді математичної моделі (5.11):



Наведена математична модель (5.11) у графо-аналітичній формі запису найбільш пристосована до відтворення логіки процесу аналізу відстані d_p між БПЛА та КЦ.

В межах кластера БПЛА-Г та всі БПЛА-П, обмінюються нейронною картою з відміченими обстеженими точками місцевості [17]. Інформація до КЦ про дії кожного кластера надсилається лише з головного БПЛА-Г p -го кластера.

На блок-схемі (рис. 5.12) наведений алгоритм почергової роботи двох блоків: пріоритетного та непріоритетного. Апаратний склад кожного з блоків буде розглянутий нижче. Спочатку через МЗ-Г на МЗ-П подається сигнал на відключення непріоритетного блоку. Після того, як пріоритетний блок або закінчив виконання свого завдання, або відстань між БПЛА стала більше ніж похибка GPS-координат, і є сенс проводити аналогічні дії пристроям і головного, і підпорядкованого БПЛА, з МЗ-Г подається сигнал на підключення непріоритетного блоку.

Починається робота блоків з та вибору користувачем пріоритетного та непріоритетного пристрою та їх підключення до відповідного модулю електроживлення (МЕ).

Кроки алгоритму для непріоритетного блоку:

Крок 1. Виконання функції.

Крок 2. Перевірка вхідних сигналів на припинення роботи (якщо сигнал прийшов – вимикання, якщо ні – повернення до роботи).

Крок 3. Після вимикання йде перевірка вхідних сигналів на поновлення роботи (якщо сигнал прийшов – поновлення роботи та повертання на початок циклу, якщо ні – повернення вимкненого стану).

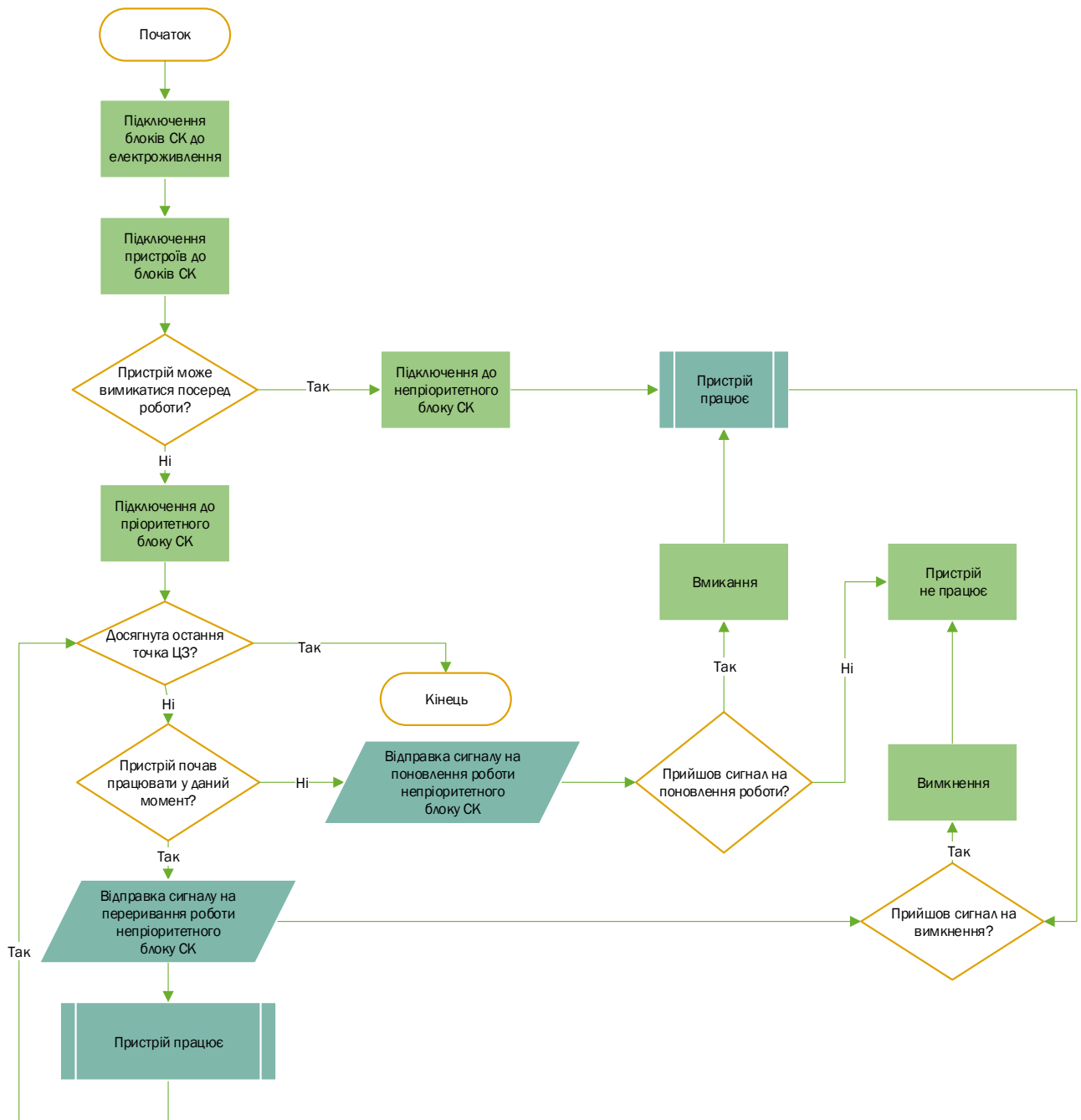


Рисунок 5.12 – Блок-схема алгоритму відключення неперіоритетного пристрою

Кроки алгоритму для пріоритетного блоку:

Крок 1. Перевірка, чи почав прилад працювати у даний час (якщо почав, то відправити сигнал на припинення роботи до непріоритетного блоку; якщо не почав – то перевірка надходження даних з Інтернету).

Крок 2. Робота (відеозйомка, моніторинг метеоданих тощо).

Крок 3. Перевірка, чи вимкнувся прилад (якщо **так**, то відправка сигналу на поновлення роботи до непріоритетного блоку та перехід до початку циклу; якщо **ні** – повернення до роботи).

Для кожного з блоків виконуються нескінченні цикли роботи до закінчення часу польоту БПЛА, на борту якого знаходиться зазначений блок.

Для відтворення роботи методу управління пристроями в умовах обмеженої потужності енергоресурсів виконане натурне моделювання на платформі Arduino, з використанням повнофункціональної мініатюрної плати Arduino Nano 3.0 на базі мікроконтролера ATmega328 [294, 373]. Плата підключається до ME кабелем Mini-B USB.

Непріоритетним приладом, наприклад, виступає цифрова камера (ЦК) підпорядкованого БПЛА (БПЛА-П-R), на яку подається електроживлення 3,3 В через вивід 17 плати Arduino Nano 3.0. Для відключення подачі електроживлення на ЦК-П може бути використане реле одноканальне SRD-5VDC-SL-C.

Вигляд компонентів для натурального моделювання наведено у додатку А.5 (рис. А.11 – рис. А.12).

Необхідно зазначити, що для пріоритетного та для непріоритетного пристроїв потрібно використовувати різні моделі Bluetooth-модулів (надалі BT-модулів). BT-модуль HC-05 (6 pin) дозволяє налагодити двосторонній радіозв'язок за протоколом Bluetooth при управлінні різними об'єктами (рис. А.12). Модуль, встановлений в прилад з мікроконтролером або без такого, забезпечує його радіозв'язок з персональним комп'ютером, Android-пристроєм або з іншим BT-модулем на відстані до 9 м після завантаження на нього відповідного скетча (рис. А.13). Безперечною перевагою цього BT-модуля перед іншими є можливість завантаження скетчу без відключення модуля від RT-TX

контактів плати Arduino. Для подальшої перевірки роботи та зміни налаштувань BT-модуля HC-05 у складі макету потрібно використовувати режим AT-команд.

Bluetooth-модуль для підпорядкованого пристрою – наприклад, HC-06 (4 pin) – виглядає як звичайний послідовний інтерфейс (рис. А.14). Тому можливо спочатку налагодити все спілкування з пристроєм на комп'ютері, а потім вже підключити цей Bluetooth-модуль до пристрою, що визначений як неперіоритетний (підпорядкований «– П» на рис. 5.13).

Під час завантаження скетчу (рис. А.15) на Bluetooth модуль необхідно, щоб зазначений модуль був відключений від мікроконтролера Arduino. Інакше скетч не буде завантаженим на модуль, тому що зв'язок з Bluetooth-модулем відбувається по одному і тому ж порту RX і TX, що й USB.

Треба зазначити, що на відміну від Bluetooth-модуля HC-05, який підключається до пріоритетного пристрою, Bluetooth-модуль HC-06 може працювати лише у Slave-режимі. Це означає, що він не може самостійно підключатися до інших Bluetooth-модулів. Bluetooth-модуль HC-06 підключається до плати Arduino на виводи 1 (TX), 2 (RX), 4 (Ground) та 27 (+5 V) (див. рис. А.11).

Запропонований бездротовий метод управління віддаленим відключенням пристроїв в умовах обмеженої потужності енергоресурсів зграї безпілотних апаратів передбачає формування кластерної архітектури в межах зграї БПЛА.

Оскільки кожен підпорядкований БПЛА передає сигнал головному вузлу утвореного кластера, а не наземному КЦ, потужність та дальність передачі суттєво скорочується. Таким чином, залишкова енергія і життєвий цикл всієї гетерогенної мережі, сформованої з дронів зграї, збільшуються у порівнянні з мережево-центричною архітектурою.

5.3 Передавання енергії між КФО бездротовими каналами

В основу підходу покладено ідею створення та використання рухомих компонентів ШГKM критичного застосування з подовженим часом енергонезалежності. Результати процесу вимірювання (наприклад, розмір

винайдених дефектів, швидкість пересування каравану, температура, показники забрудненості та/або випромінювання у зоні функційного модуля тощо) у шифрованому та/або стеганографічному вигляді передаються у складі загальної інформації (нп., метеодані під час руху КС, відносні координати функційного модуля КС у складі каравану, тощо) до військового КЦ та/або диспетчерського центру компанії-власника КС засобами досяжних відкритих каналів зв'язку [84].

Тенденції розвитку сучасної техніки направлені на створення легких, автономних мобільних пристроїв. Такі мобільні пристрої мають бути максимально компактними, при цьому не втрачаючи функціональної ефективності. Однією з ключових характеристик даних пристроїв є час їх автономної роботи. Цей час залежить від багатьох факторів. Основні з них:

- ємність батареї;
- енергоспоживання компонентів приладу;
- оптимізація програмного забезпечення.

Конфігурація об'єктів ШГКМ може бути такою, що деякі КФО, не пов'язані з виконанням пріоритетних завдань ШГКМ, мають більший запас енергії або накопичують її під час вимірювань (датчики тиску, акселерометри на базі п'єзокерамічних датчиків фізичних величин та ін.). В такому разі накопичена енергія може бути переданою між об'єктами ШГКМ засобами бездротових технологій, за допомогою яких утворюються канали зв'язку [220].

Треба дослідити можливі канали передавання накопиченої енергії від поліметричних датчиків для подальшого її використання на інших об'єктах ШГКМ. Якщо мета датчиків, крім вимірювання фізичних величин, полягає в зборі радіочастотної потужності та перетворенні її в енергію постійного струму, то завданням бездротових модулів (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee тощо), через які здійснюється передача даних, може стати також передача накопиченої датчиками енергії іншим об'єктам ШГКМ.

Розглянемо процес розроблення алгоритму передачі енергії з використанням Wi-Fi-каналів, що не перетинаються.

Більшість Wi-Fi модулів зв'язку, які використовуються в моніторингових

ШГКМ, працюють у діапазоні частот 2,412–2,484 ГГц, що належить до неліцензованого ISM-діапазону [264]. На сьогоднішній день мабуть, самим популярними пристроями для бездротового зв'язку через Wi-Fi і організації Інтернету речей (IoT) є плати ESP8266 від компанії Espressif Systems, RTL8710 від компанії Realtek. Для об'ємних за кодом програм можна задіяти модуль Digistump Oak [99]. Важливо, щоб обраний модуль міг працювати у режимі «Sleep» та «Deep Sleep modes for low power usage».

Основи сукупної технології (технологія PoWiFi – Power-over-WiFi), яка дозволяє засобами одних і тих же модулів бездротовим каналом пересилати й інформацію, й енергію, успішно випробувані для живлення сенсорів та інших пристроїв, від роутера, підключеного до електромережі змінного струму 220 В [186]. Доведено, що енергії, перенесеної сигналами Wi-Fi, достатньо для забезпечення роботи малопотужних пристроїв – наприклад, датчиків температури, монохромної камери низької роздільності (176 x 144 пікс., потужністю 60 мВт, напругою 2,4 В кожні 35 хв) на відстані до 8,5 м. Авторами [186] зазначено, що за технологією PoWiFi може бути перенесена й більша енергія, але в США Федеральна комісія із зв'язку (англ. Federal Communications Commission або FCC) потужність бездротових пристроїв обмежує до 1 Вт. В Україні відповідною установою є НКРЗІ, що встановила обмеження на потужність активного бездротового обладнання, на яке не потрібні дозволи, в 200 мВт [362].

Слід зазначити, що використання PoWiFi може привести до істотного зростання внутрішньої інтерференції і загального зниження пропускну здатності мережі Wi-Fi. Тому доцільно для відправки енергетичних фреймів з метою акумулювання енергії на інших об'єктах ШГКМ використовувати інші частотні канали, а не той самий, на якому здійснюється передача даних. Також необхідно передавати додаткові «енергетичні пакети» в інші проміжки часу, коли інформація не передається. Таким чином, задля уникнення інтерференції сигналів, що передаються в єдиному бездротовому просторі (радіоефірі), в одному сеансі зв'язку (нп., при виконанні i -го з m завдань) доцільно

використовувати частотні канали, які не перетинаються.

Більшість пристроїв на основі вищезазначених модулів підтримує 11 частотних каналів технології Wi-Fi. На таке обладнання встановлено вбудоване програмне забезпечення (якщо мова йде про активне вендорське WiFi-обладнання – роутери, точки доступу та ін.) або драйвери (якщо мова про клієнтські адаптери) для домену або набору частотних каналів FCC (США). У зазначеному домені всього три непересічних канали (Ch. 1, 6 і 11 на рис. 5.13).

В Європі Wi-Fi обладнання підтримує діапазон або домен ETSI (англ. European Telecommunications Standards Institute – Європейський інститут по стандартизації в галузі телекомунікацій), в якому використовується додатково 12-й і 13-й канал. У цьому випадку додатково утворюється ще 2 комплекти непересічних каналів: Ch. 2, 7, 12 та Ch. 3, 8, 13 (див. рис. 5.13).

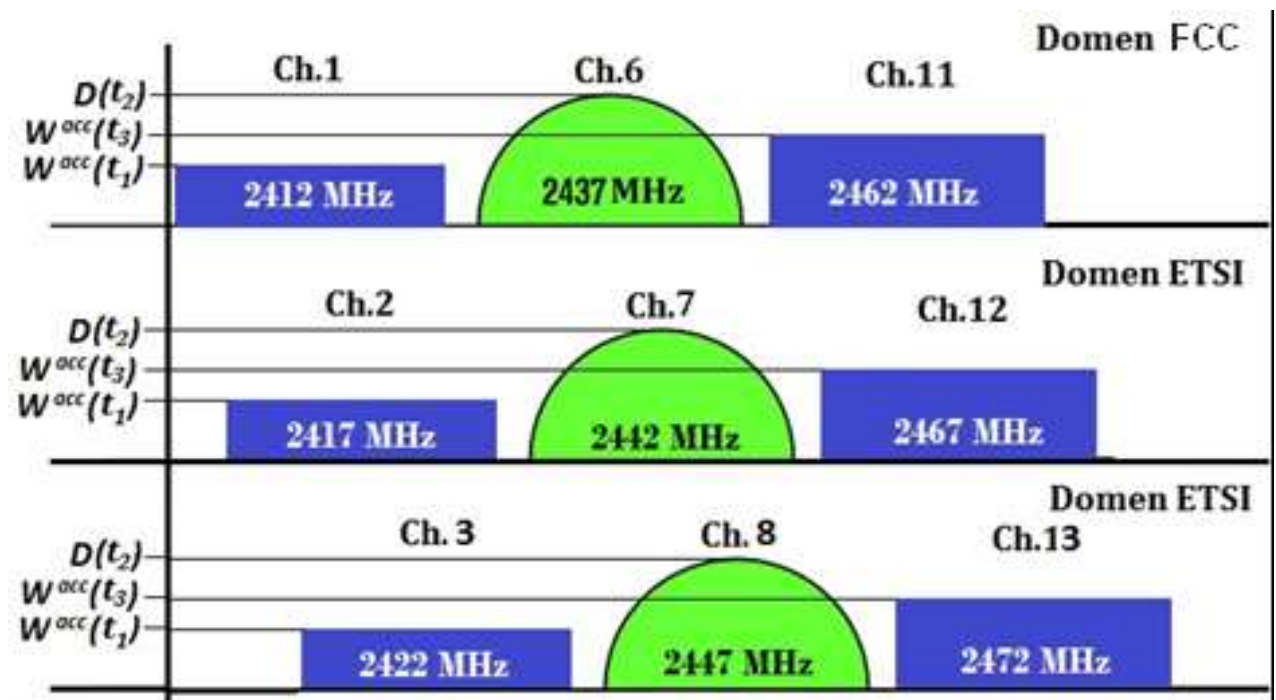


Рисунок 5.13 – Розподіл функцій передачі даних та енергетичних фреймів між каналами, що не пересікаються у діапазоні 2,4 ГГц

В японському обладнанні не перекривається з сусідніми також 14-й канал з центральною частотою 2484 МГц.

З метою запобігання інтерференції каналів, що передають дані та енергетичні фрейми має сенс розробити процедуру пересилання енергії між WiFi-компонентами об'єктів ШГКМ, за яким дані та енергія передаватиметися на каналах, що не пересікаються, та у різні проміжки часу (рис. 5.14).

Для таких наборів частот в кожному з них пропонується передавати дані по одному каналу, який є центральним у кожному наборі – Ch. 6, 7 або 8 (див. рис. 5.13).

Як показано на рис. 5.14, енергетичні фрейми в такому випадку можна передавати по двом іншим непересічним каналах відповідного набору (відповідно, 1-му та 11-му, 2-му та 12-му, 3-му та 13-му). Причому, враховуючи, що передавання накопиченої потужності вимірювань $W_{ij}^{rec}(t_1)$ за TimeLine передує моменту передачі даних $D_{ij}(t_2)$, а передавання потужності $W_{ij}^{rec}(t_3)$ здійснюється після передачі даних, рівень акумульованої потужності $W^{acc}(t_3)$ буде вищим ніж $W^{acc}(t_1)$. К моменту t_3 можна приурочити вимірювання якимось іншими датчиками (не п'єзоелектричними), фотозйомку або інші технологічні режими, для виконання яких достатній результуючий рівень накопиченої потужності W^{mod} .

На рис. 5.14 можна побачити, що надлишкова енергія W_{ij}^{acc} , наприклад, накопичена вимірювачами на інших КФО, передана через канали зв'язку під час виконання i -го завдання на j -му ядрі. Якщо ця енергія є достатньою для включення модулю та виконання їм власних функцій, то процес накопичення енергії під час сеансу зв'язку закінчується, й названий функційний модуль БПЛА (сенсор, камера, обчислювач тощо) починає виконання своїх специфічних функцій (вимірювання фізичних величин, зйомку, обробку даних, маневрування тощо), як це визначене у виразі (5.4).

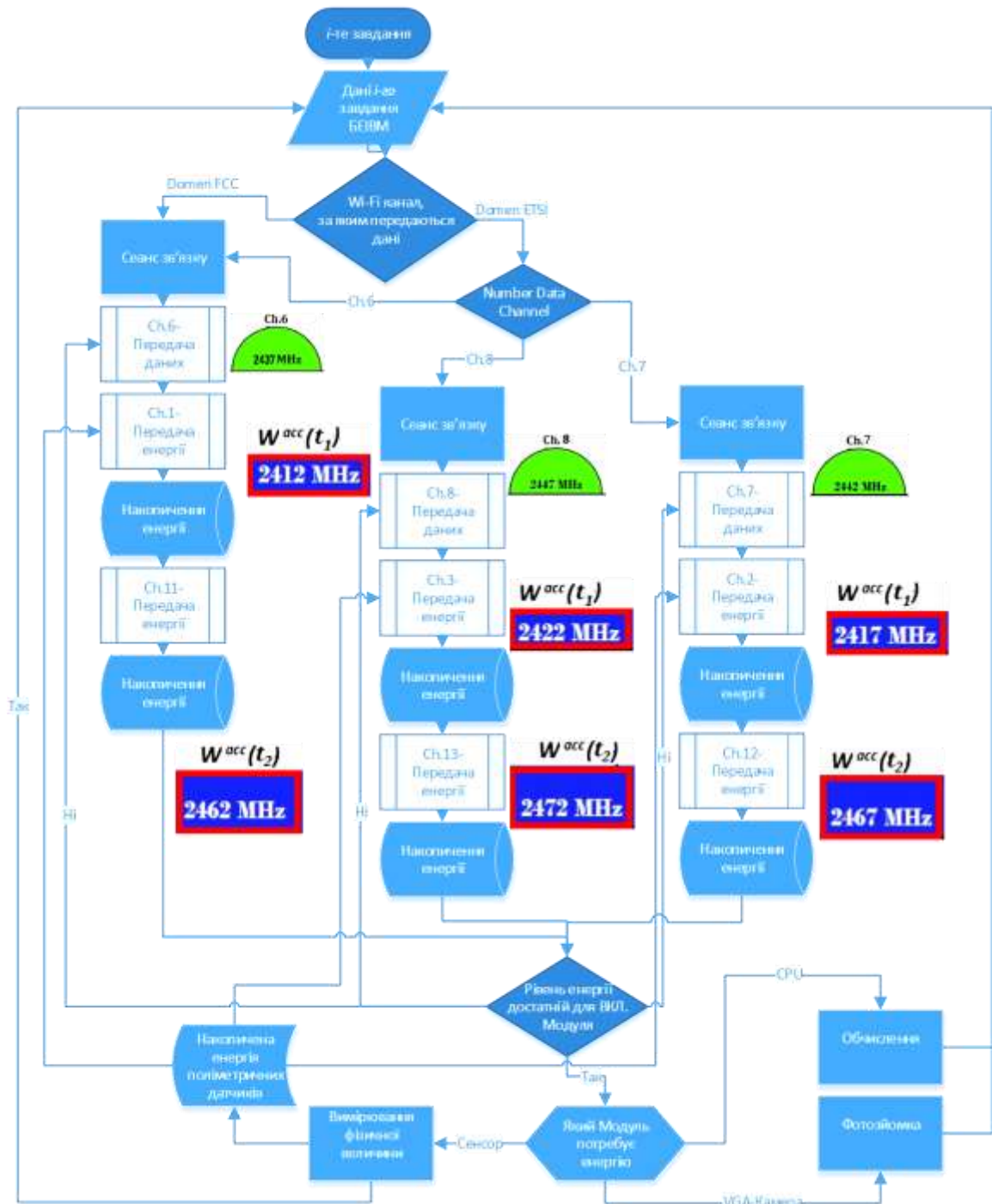


Рисунок 5.14 – Процедура розподілу за каналами та часом передачі даних та енергетичних фреймів через Wi-Fi

У запропонованій модифікації бездротового методу передавання також передбачено, що модулі ШГКМ, які живляться від надлишкової енергії інших КФО, включатимуться лише після накопичення енергії достатнього рівня. Інакше, при нестачі струму, наприклад, для живлення модулів зв'язку, не буде відповіді на будь-яких швидкостях, навіть при зниженні рівня швидкості до

мінімуму (9,6 кбіт/с). При використанні вищеописаної процедури не відбувається деградації даних, переданих через Wi-Fi, та деградації продуктивності мережі.

Метод бездротової передачі енергії між КФО на основі технології PoWiFi, що набув подальшого розвитку в дисертаційній роботі, дозволяє збільшити час життя ШГКМ шляхом підзарядки акумуляторів БПЛА без повернення на базу.

Висновки до Розділу 5

1. На основі аналізу ефективності розподілу завдань між ядрами обчислювального процесора БПЛА набула подальшого розвитку математична модель диспетчеризації завдань обчислювачів об'єктів ШГКМ за рахунок введення коефіцієнтів навантаженості кожного ядра з вивільненням 1-го ядра CPU від технологічних завдань для процесів управління. Показано, що прив'язка процесів до трьох ядер замість чотирьох на 15,7 % зменшує енергоспоживання БПЛА без суттєвого перегріву процесора у порівнянні з режимом виконання завдання за стандартним планувальником завдань ОС. Навіть при немаксимальній швидкості польоту цієї моделі БПЛА у 50 км/год (Режим Р) [147] це збільшить дальність професійної аерофотозйомки на 1,3 км з урахуванням повернення на базу. Розроблення ефективних режимів навантаження процесора дозволила зменшити коефіцієнт навантаженості CPU на 23 % для чотирьох ядерного процесора Qualcomm Snapdragon 400, на якому базуються сучасні моделі БПЛА.

2. Запропонований метод усунення дублювання виконання функцій БПЛА за рахунок розроблення управління віддаленим відключенням неперіоритетних пристроїв та/або ушкоджених функційних модулів на борту БПЛА одного суброю, що дозволяє зекономити до 11,2 % енергії батареї БПЛА.

3. Набув подальшого розвитку метод бездротового передавання енергії між КФО на основі технології PoWiFi за рахунок розробленої циклограми з чергуванням інтервалів передачі даних та передавання енергії з використанням різних груп WiFi-каналів, що не перетинаються, згідно з правилами доменів FCC та ETSI, що дозволяє збільшити час життя ШГКМ.

РОЗДІЛ 6

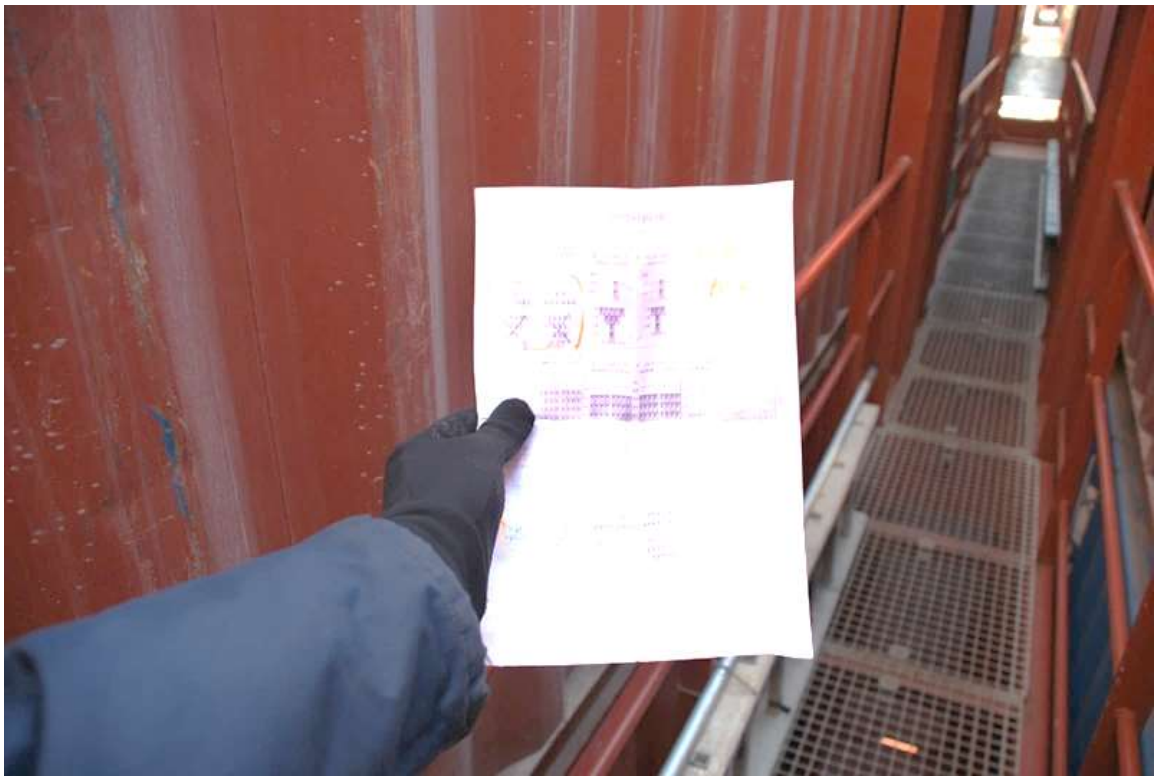
РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ПРИКЛАДНИХ РІШЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ШВИДКОДИНАМІЧНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ МОНІТОРИНГОВИХ МЕРЕЖ

6.1 Комп'ютерна система реєстрації великорозмірних вантажів контейнерного типу за допомогою мобільних первинних реєстраторів

Незважаючи на зростаючу комп'ютеризацію водних транспортних перевезень, наразі процес обліку завантаження/розвантаження безпосередньо на судні відбувається вручну працівником вантажного комплексу – тальманом, який є робітником стивдорної компанії і надає інформацію про стан вантажу (рис. 6.1). Капітану судна лише наприкінці зміни у вигляді звичайного звіту, який називається тальманською розпискою (рис. 6.2) [390].



Рисунок 6.1 – Ручний облік контейнерів на судні [344]



б)

Рисунок 6.2 –Формування тальманської розписки при ручному обліку контейнерів [344]

Компанії, які займаються перевезенням вантажу у контейнерах, несуть відповідальність за його збереження. Тому, екіпаж має забезпечити необхідну остійність судна, контролювати його крен та диферент. Зважаючи на це, капітан має потребу у отриманні детальної інформації щодо завантаження/розвантаження судна у реальному часі, під час стоянки у порту [39].

Таким чином, актуальним питанням є автоматизація обліку процесу розвантаження і завантаження контейнеровозів для економії часу і ресурсів екіпажу, виключення помилок обрахунків, зумовлених людським фактором. Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити задачу надання капітанові судна у режимі реального часу на ноутбук/планшет або інший пристрій інформації про кількість вантажу у кожній секції контейнерів на судні. Визначити позицію кожного контейнера на судні можливо за допомогою трьох координат: Bay – секція, Row – ряд і Tier – ярус (рис. 6.3).



Рисунок 6.3 – Нотація обліку розташування контейнерів на палубі [210]

Існують системи обліку контейнерів на судах, які передбачають створення бездротового маршруту передачі інформації «судно – вантажний комплекс» [175, 340]. Але, на жаль, підключення судна у WiFi-мережу порту не завжди можливо за низкою технічних обставин (нп., через металеві конструкції виробничих терміналів). В такому разі доцільно запропонувати рішення, за яким облікова система контейнеровоза працюватиме у власній локальній мережі, яке б не потребувало ані підключення до портових серверів, ані підключення до Інтернет [341, 280, 286].

Для впровадження висловленої ідеї на даху контейнерів у кожній секції ряду на палубі, найближчого до причалу, запропоновано розмістити мобільний пристрій на ОС Android, який реєструє контейнер, коли стріла портокрана переносити його над фотокамерою девайса-реєстратора (рис. 6.4).

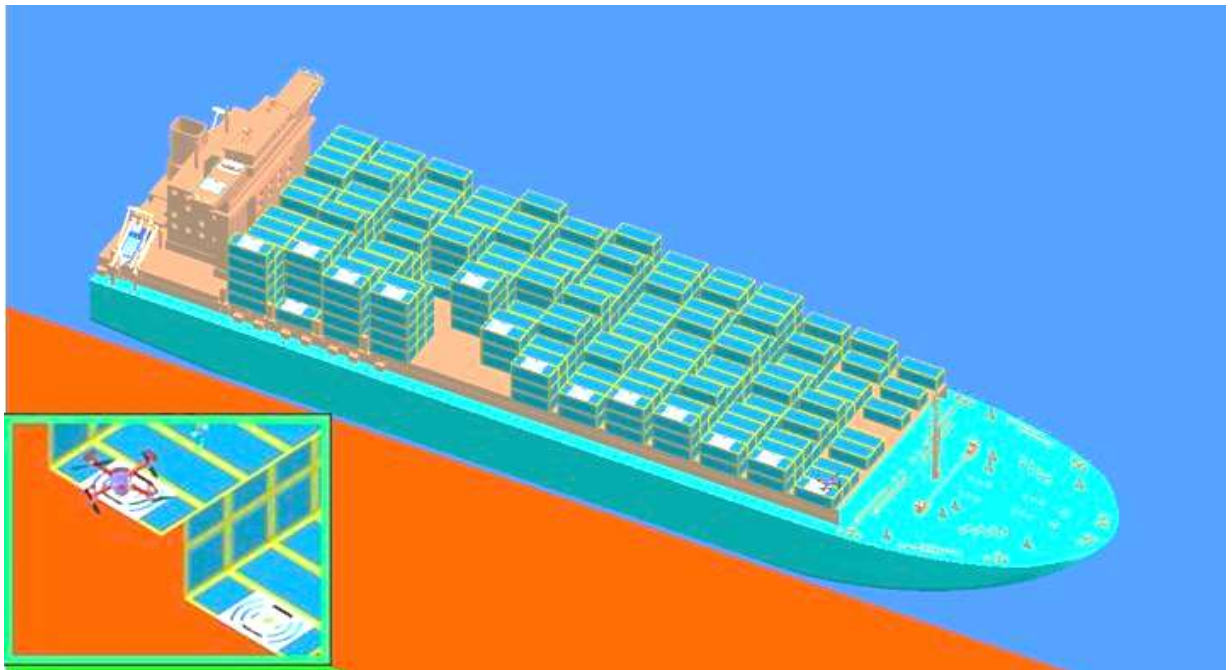


Рисунок 6.4 – Загальний вигляд судна-контейнеровоза з WiFi-реєстраторами

В якості засобу доставки мобільного реєстратора на верхній Tier крайнього Row можливо використання дрона з захватом (Grabber) [143]. На теперішній час вже існують декілька конструкцій спеціальних захватів для дронів, розроблених французькими, японськими та ін. фірмами (рис. 6.5).

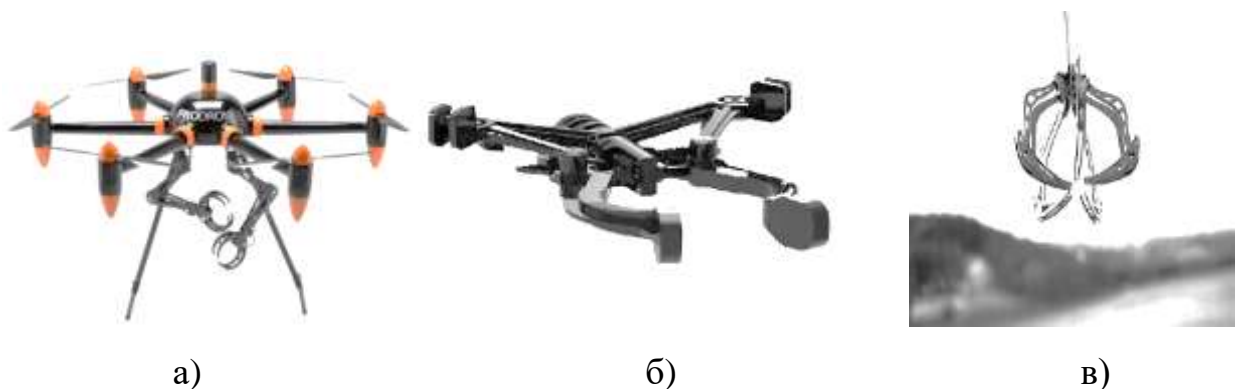
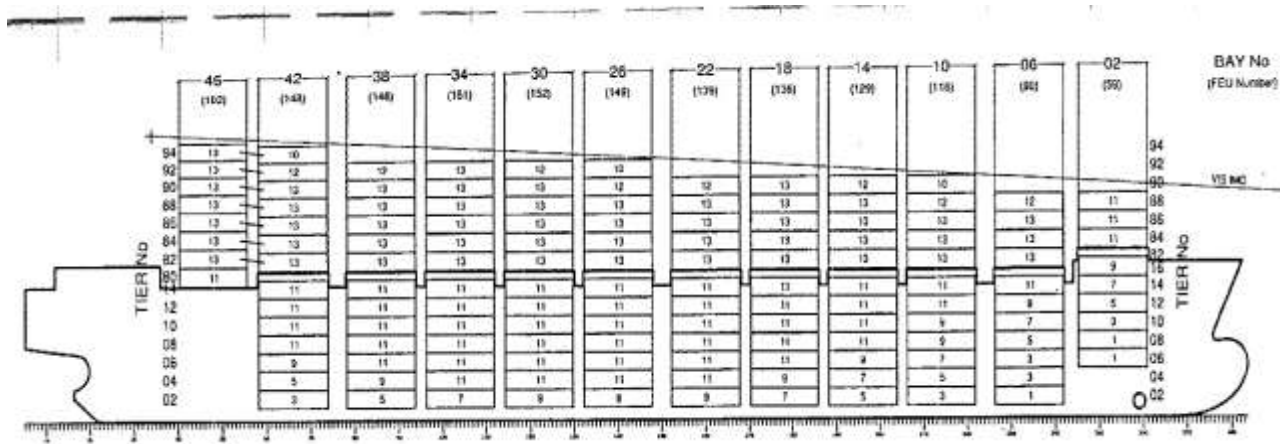


Рисунок 6.5 – Спеціалізовані захвати для дронів PRODRONE (а) [61], Parrot (б) [143], Mantis Drone Claw (в) [313]

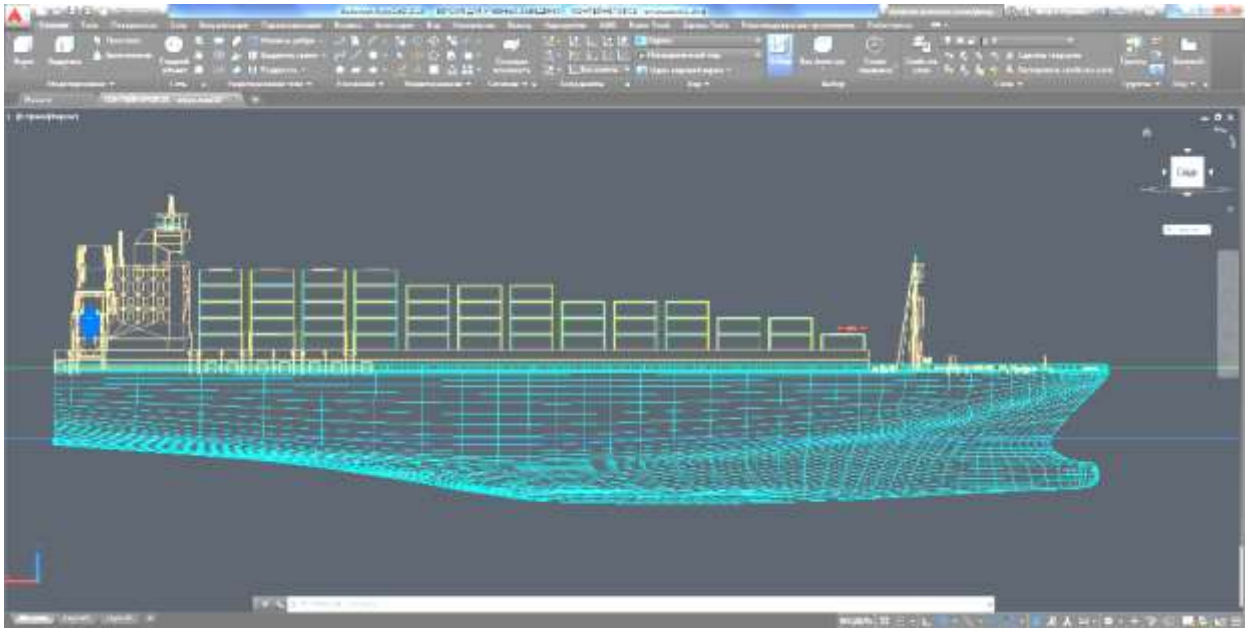
При торканні реєстратором контейнера при спуску або мотор відкриває Grabber (управління здійснюється через USB-порт), або захват відкривається автоматично від удару при падінні.

Для підвищення ефективності експлуатації контейнеровозів кількість ярусів контейнерів на палубі може бути до 8–9 шт. Для розроблення ПЗ описаної

КС автоматизованого обліку контейнерів необхідно спочатку створити 3D-візуалізацію бау-плану розміщення контейнерів на судні (рис. 6.6).



a)



б)

Рисунок 6.6 – Бау-план контейнеровоза (а) та його 3D-візуалізація (б)

У такому разі, при нерівномірному розвантаженні контейнерів у рядах, в кожній секції необхідно розмістити мобільні пристрої в кожній секції на дахах контейнерів першого ряду, найближчого до борту судна. Причому, пристрої мають бути встановлені як на самому високому ярусі, так і на декількох ярусах проміжної висоти до мінімального (рис. 6.7).

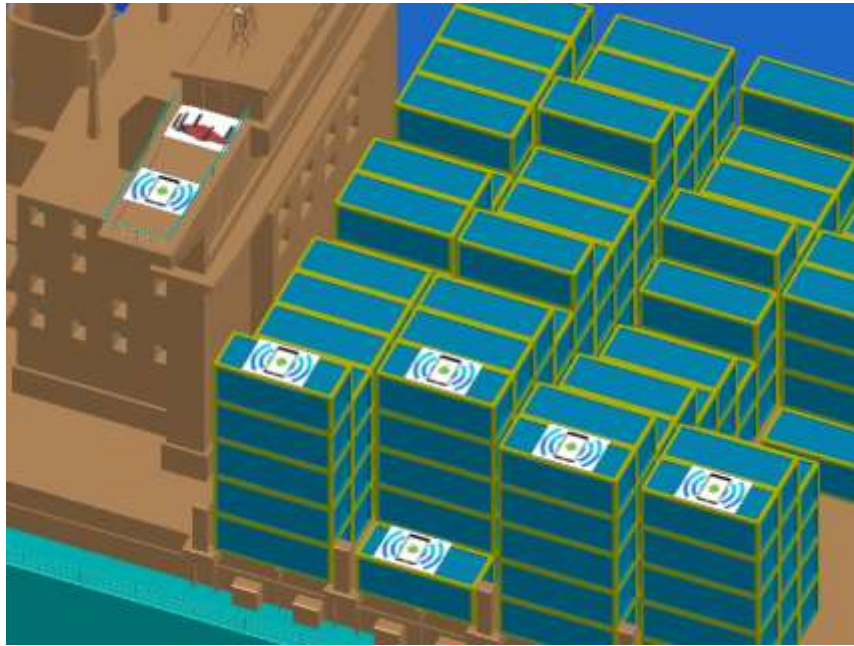


Рисунок 6.7 – Розміщення реєстраторів на декількох ярусах різної висоти

Методами дослідження є сукупність методів встановлення параметрів фотокамер мобільних пристроїв таким чином, щоб їх лічильники спрацьовували в момент проходження стріли портокрана з контейнером, що за-/вивантажується (перетинає борт судна), та змінені показання лічильників передавались на пристрій капітана через бездротову локальну мережу судна-контейнеровоза.

Значення лічильника кадрів одразу після зміни стану пристрою, тобто фіксації руху, передається через локальну WiFi-мережу судна на пристрій капітана, де відображається зменшення кількості контейнерів у відповідній секції (рис. 6.8).



а)



б)



в)

Рисунок 6.8 – Загальний вигляд графічного інтерфейсу на мобільному реєстраторі (а) та на пристрої капітана (б, в)

Коли мобільний пристрій разом з контейнером, на якому він розміщений, забирається портокраном, квадрокоптер приносить новий пристрій на найближчий до причалу контейнер у секції, де розташовувався попередній контейнер (див. рис. 6.7). Дрон переміщується виключно над судном, не заходячи на територію порту, що узгоджується зі стивідорною компанією, яка обслуговує судно-контейнеровоз у цьому порту.

Для реалізації описаного методу було розроблене ПЗ під управлінням ОС Android [395]. Слід підкреслити, для задач реєстрації руху та передача даних в описаній бездротовій моніторинговій локальній мережі достатньо мінімальних технічних характеристик і ресурсу акумулятора мобільних пристроїв. Так, досліджувані мобільні пристрої дали позитивні результати у процесі реєстрації

великого вантажу над пристроєм вже на рівнях API Level 14–17, які відповідають версіям платформи Android 4.0–4.2 [239].

Розроблена програма пристрою-реєстратора контейнерів працює за наступним алгоритмом.

Екран пристрою при працюючому мобільному застосунку стає максимально бляклим, більш бляклим, аніж це можливо зробити за допомогою кареток, що є елементами меню пристрою, а також виставлений у режим FLAG_KEEP_SCREEN_ON, що не дає екрану гаснути навіть після тривалого часу відсутності взаємодії з тач-скріном.

Оскільки оперативна пам'ять (RAM – Random Access Memory) у більшості пристроїв припускається якомога низька (до 512 Мбайт), повинна бути забезпечена висока продуктивність обробки зображень. Цього було досягнуто шляхом використання найменшої можливої роздільної здатності, яка виставляється для кожного пристрою програмним шляхом при першому запуску пристрою. Це неухильно означає втрату якості зображення, проте вона не є першорядною для даної системи.

У подальших версіях через виникнення можливої потреби у більшій роздільній здатності зображень (наприклад, для кешування), можлива модифікація не у сторону погіршення якості зображення, а розпаралелювання процесу обробки даних між потоками виконання.

Для організації кросплатформності ПЗ розробленої автоматизованої системи немає необхідності повністю переписувати код застосунку. Алгоритм визначення руху об'єктів, який використано, сам по собі є універсальним.

Проте, при розробленні програмних застосунків для інших мобільних операційних систем (Windows Mobile, iOS тощо) необхідно буде використовувати відповідні нативні бібліотеки для маніпулювання робочими режимами камер реєстраторів.

6.2 Виявлення місць витоку теплової енергії з прихованих об'єктів засобами комп'ютерної системи на основі РММ

Використання КС на основі РММ може значно скоротити час виявлення і відновлення несучої здатності ділянок трубопроводів теплотрас з локальними пошкодженнями. Найбільш перспективними є термографічні методи. Інфрачервоне випромінювання – це перевірена неінвазійна технологія, яка виявляє виток в системах теплових труб без будь-яких руйнувань при розритті покриття автотрас, під якими в містах зазвичай розташовані теплотраси. За допомогою КС можна не лише виявити місця локального витоку тепла на підземних теплових трубопроводах, але й передавати дані, наприклад, з тепловізора через бездротові порти до місця, де здійснюється облік. Зазначене рішення дозволяє визначити точне місце втрати теплової енергії, виключити непотрібне риття, руйнування і витрати. Такі методи, іменовані дистанційним зондуванням або повітряною термографією, широко використовуються в США, Швеції і Норвегії та ін. [63]. Зазвичай система візуалізації витоків розміщена на БПЛА роторного типу або з фіксованим крилом. Одним з найкращих сучасних апаратних рішень для дослідження втрат енергії на тепломагістралі є використання тепловізора, розміщеного на квадрокоптері. Одним з найкращих сучасних апаратних рішень для таких досліджень є тепловізор Zenmuse XT developed by FLIR technology (вартістю біля \$7,000 USD) у поєднанні з квадрокоптером DJI Matrice 210 (вартістю біля \$12,000 USD), наведені на рис. 6.16, а, але таке рішення коштує близько \$ 20,000 USD.

Найчастіше такі системи не дають точного, прив'язаного до геокоординатам, місця аварії і тому є марними для ремонтної бригади. Але позитивним є те, що сучасні методи виявлення витоків дозволяють точно визначити витік тепла до 1 кв. м, тому при ремонті труб будь-які роботи по розкопках зводяться до мінімуму. Зазвичай після виявлення місця витоку теплової енергії складається письмовий звіт з фотографіями термограм розташування місця аварії та рекомендаціями. Або діагностична бригада повинна

чекати ремонтників на виявленому місці аварії. У зв'язку з відсутністю в таких методах ідентифікації технологічних об'єктів, використовується їх обстеження вручну згідно з нанесеним на географічну мапу маршрутом, після чого створюється теплова карта [219].

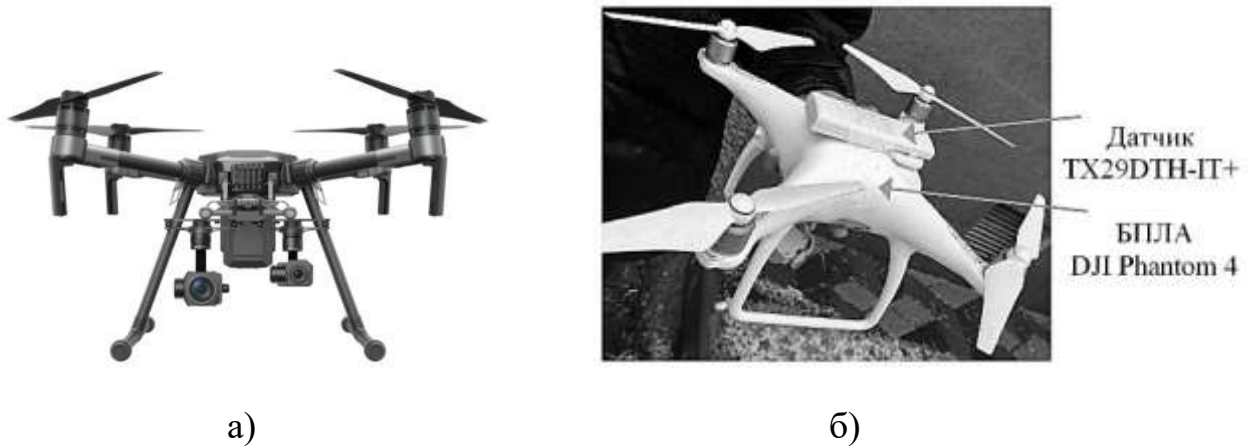


Рисунок 6.16 – Квадрокоптер DJI Matrice 210 з тепловізором Zenmuse XT та відеокамерою на борту (а) та квадрокоптер DJI Phantom 4 з датчиком TX29DTH-IT на борту (б)

Розроблена КС базується або на основі пірметра, або на основі датчиків температури з бездротовою передачею виміряних температур до узагальнюючого пристрою. У будь-якому випадку такі датчики встановлюються на дрон (рис. 6.16, б).

На відміну від вищезгаданих існуючих рішень, зазначена КС має вартість об'єкта-вимірювача в 5 разів менше (близько \$ 1100 USD разом з БПЛА) та ряд переваг, таких як:

- вимірювання температури об'єкта за допомогою безконтактного інфрачервоного променя;
- можливість передачі отриманих даних через Bluetooth-порт 4.0 до комп'ютерного обладнання;
- одночасно така КС може опрацьовувати дані з РММ, що налічує до 50 БПЛА.

Виміряна температура записується в базу даних мобільного пристрою (метеостанції, планшета тощо) і може бути завантажена в хмарне сховище, як описано у п. 4.2. Потім виміряні дані наносяться на мапу місцевості як значення або як теплову карту. На рис. 6.17 наведена блок-схема формування теплової карти обстежуваного об'єкта (а) та структурна схема процесу функціонування КС (б).

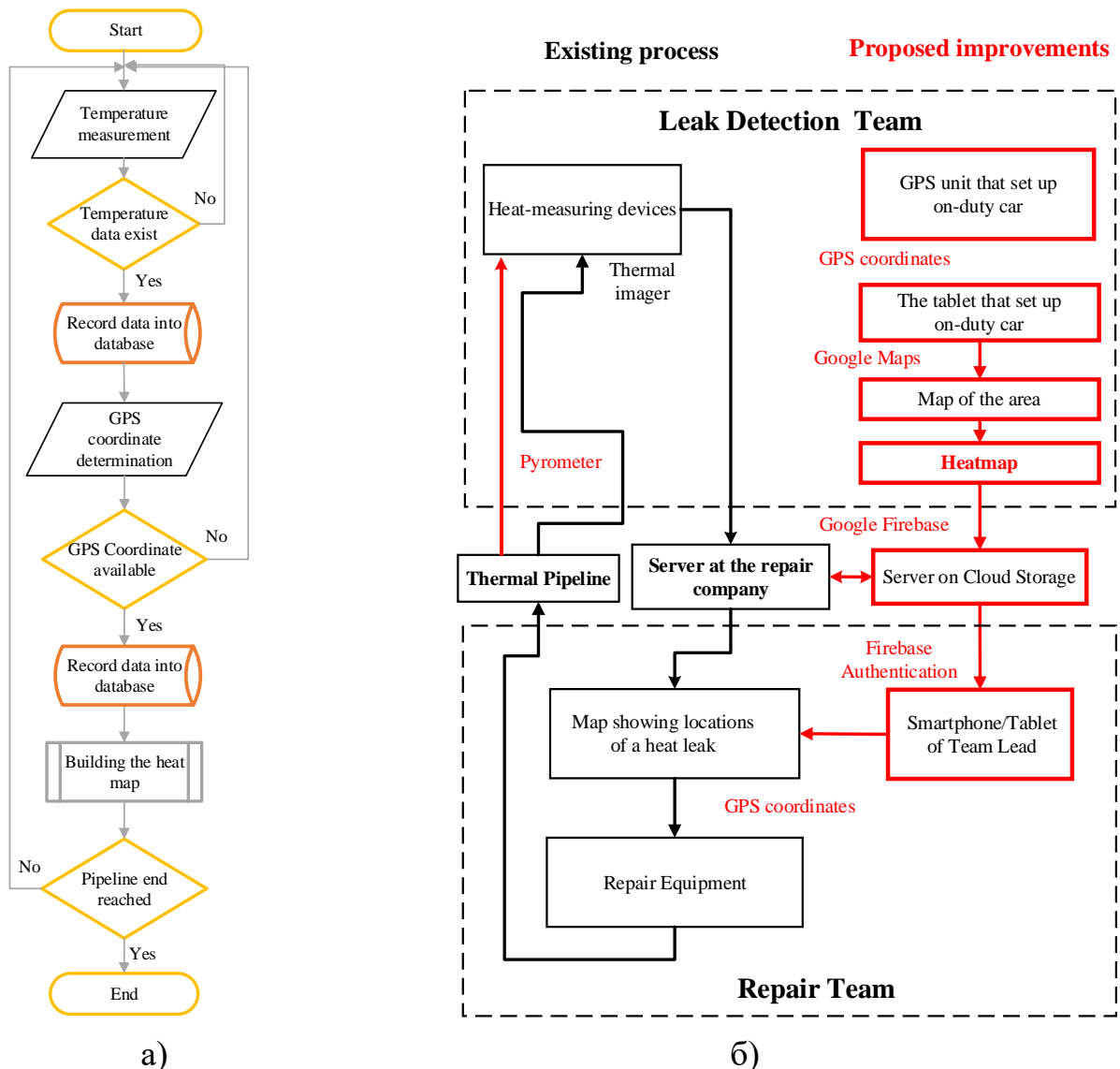


Рисунок 6.17 – Блок-схема побудування теплової карти обстежуваного об'єкта (а) та структурна схема процесу функціонування КС (б)

Далі при отриманні температурних даних з датчика або пірометра відбувається процес збору координат, а саме широти і довготи за допомогою GPS-модуля БПЛА.

Якщо дані отримані – вони також заносяться до бази даних, а у разі ж їх відсутності – теплову карту не буде побудовано. Чергова машина з вимірювальним обладнанням рухається далі, до точки з новою геолокацією, де будуть здійснені наступні вимірювання.

Останнім етапом є сама побудова теплової карти. Для цього потрібно додати відображення координат на Google Maps. Для цього використовується бібліотека *com.google.maps.android:android-maps-utils* [219].

Подальшим розвитком запропонованого методу є застосування хмарних технологій, коли отримані дані (температура та GPS-координати) завантажуються на Google Firebase. Повний технологічний процес в такому випадку наведений на рис. 6.17, б та рис. 6.18.



Рисунок 6.18 – Процедура пошуку прихованих місць витоку теплової енергії за допомогою об'єкта ШГКМ: а – з розміщенням тепловимірювача на автомобілі, б – з розміщенням тепловимірювача на БПЛА

Об'єктами для пошуку тепловитоків можуть бути як багатоповерхівки (рис. 6.19, а), так і міські автодороги зі скритими під ними теплотрасами (рис. 6.19, б).



а)



б)

Рисунок 6.19 – Об’єкти для пошуку тепловитоків за допомогою КС на основі РММ з БПЛА: а – багатоповерхівка, б – теплотраса під автомобільною дорогою

Для тестування побудованої КС було проведено заміри температури теплотрас по вул. 3-я Слобідська (м. Миколаїв), починаючи з проспекту Центрального і закінчуючи вул. Заводська.

У результаті температурних вимірювань було виявлено порив теплотраси на перетині вул. 3-я Слобідська та вул. Чкалова, про який можна побачити в табл. 6.1. Температура теплотраси на вул. Чкалова значно відрізняється від інших. За допомогою розробленої КС ремонтне обладнання було точно позиціоновано над місцем пориву (рис. 6.19, б), що суттєво скоротило час ремонту та обсяг руйнування покриття автотраси.

Після проведення ремонтних робіт було зроблено другі заміри температури теплотрас за тими ж адресами. Заміри проводилися 24 січня, температура оточуючого середовища була нижчою, а тому і середня температура теплотрас впала в порівнянні з попередніми вимірюваннями, що були зроблені в жовтні.

Як бачимо з табл. 6.2, значення температури вздовж теплотраси не відрізняються значним образом одне від одного, і саме тому робимо висновок, що порив теплотраси ліквідовано.

Таблиця 6.1 – Температурні вимірювання на тепломагістралі при підготовці до опалювального сезону (в жовтні місяці)

Температура, °С	Східна довгота, град.	Північна широта, град.	Висновок щодо стану тепломагістралі
+13,8	32,011009	46,970312	неушкоджена
+14,2	32,012510	46,967368	неушкоджена
+14,1	32,013154	46,965597	неушкоджена
+22,6	32,013060	46,962030	порив
+25,2	32,012781	46,961381	порив
+7,2	32,012688	46,958510	неушкоджена
+7,0	32,011994	46,953942	неушкоджена
+7,1	32,012019	46,949474	неушкоджена

Таблиця 6.2 – Температурні вимірювання на тепломагістралі під час опалювального сезону (в січні місяці)

Температура, °С	Східна довгота, град.	Північна широта, град.	Висновок щодо стану тепломагістралі
+3,6	32,011009	46,970312	неушкоджена
+4,1	32,012510	46,967368	неушкоджена
+4,4	32,013154	46,965597	неушкоджена
+5,2	32,013060	46,962030	неушкоджена
+5,2	32,012781	46,961381	неушкоджена
+3,4	32,012688	46,958510	неушкоджена
+3,0	32,011994	46,953942	неушкоджена
+4,1	32,012019	46,949474	неушкоджена

Для візуалізації результатів роботи КС на основі РММ уздовж теплотраси була проведено розроблення ПЗ в Android Studio 3.3.1, програмний продукт призначений для платформи Android з версією JDK 11.0. Діаграма класів ПЗ наведена на рис. 6.20 [219].

CurrentApplication – клас, що відповідає за життєвий цикл застосунка. Виконує ті або інші дії в залежності від стану застосунку.

PointModel – клас, що відповідає за представлення одиничної точки інформації, яка відображається на мапі місцевості.

PointPackModel – клас, що слугує контейнером для списку *PointModel*.

BaseActivity – базовий клас (батьківський) для всіх *Activity*-сутностей. Класи відповідають за елементи з візуальним вмістом.

BaseMapActivity – клас з базовим функціоналом Google Map.

SplashActivity – клас, що відповідає за відображення екрана завантаження застосунку.

MainActivity – клас, що відповідає за відображення мапи з функціональними точками.

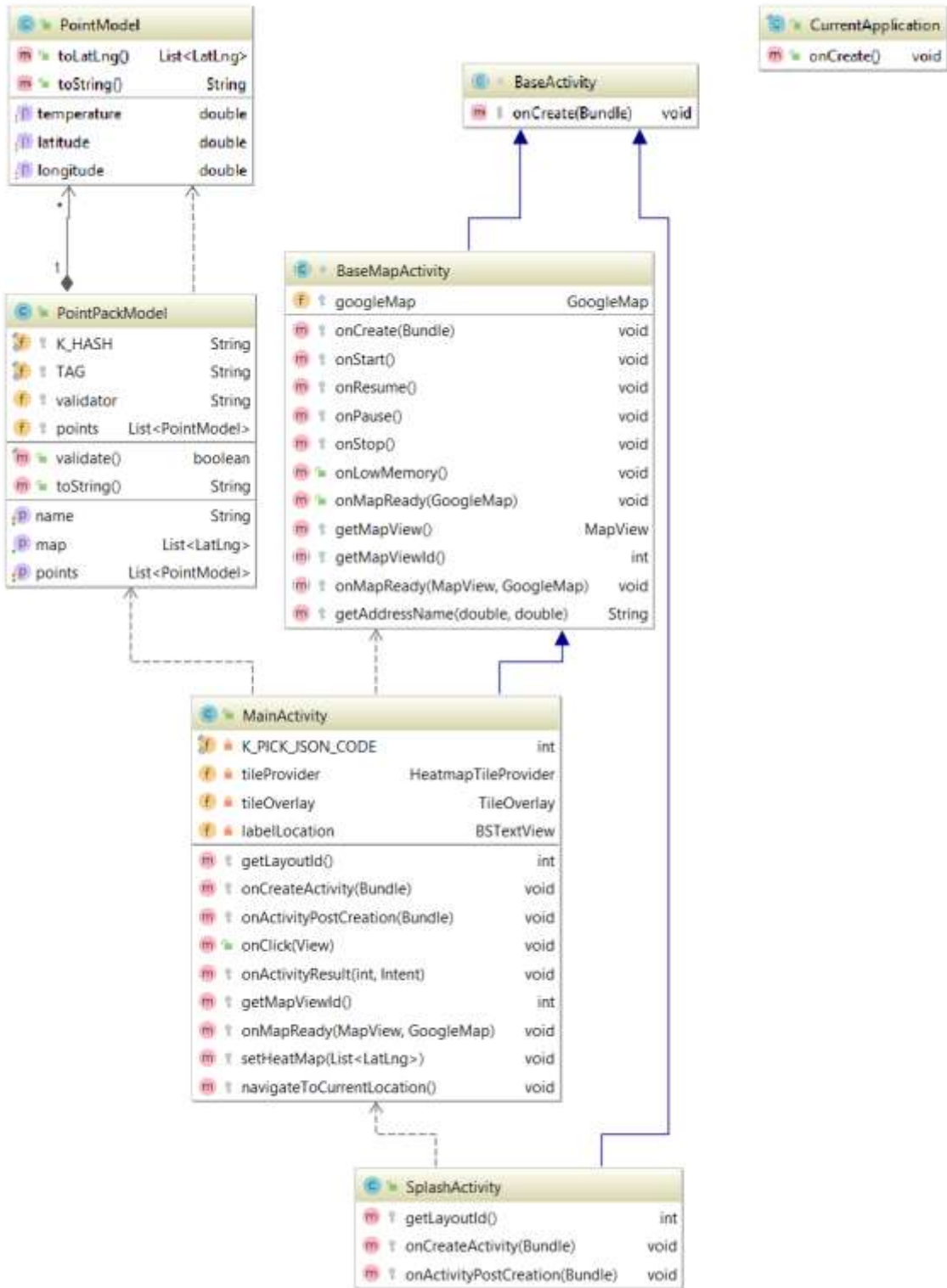


Рисунок 6.20 – Діаграма класів програмного застосунку для відображення тепловою картою знайдених місць локального витоку тепла

На рис. 6.21 наведені скріншоти інтерфейсу розробленого Android-застосунку.

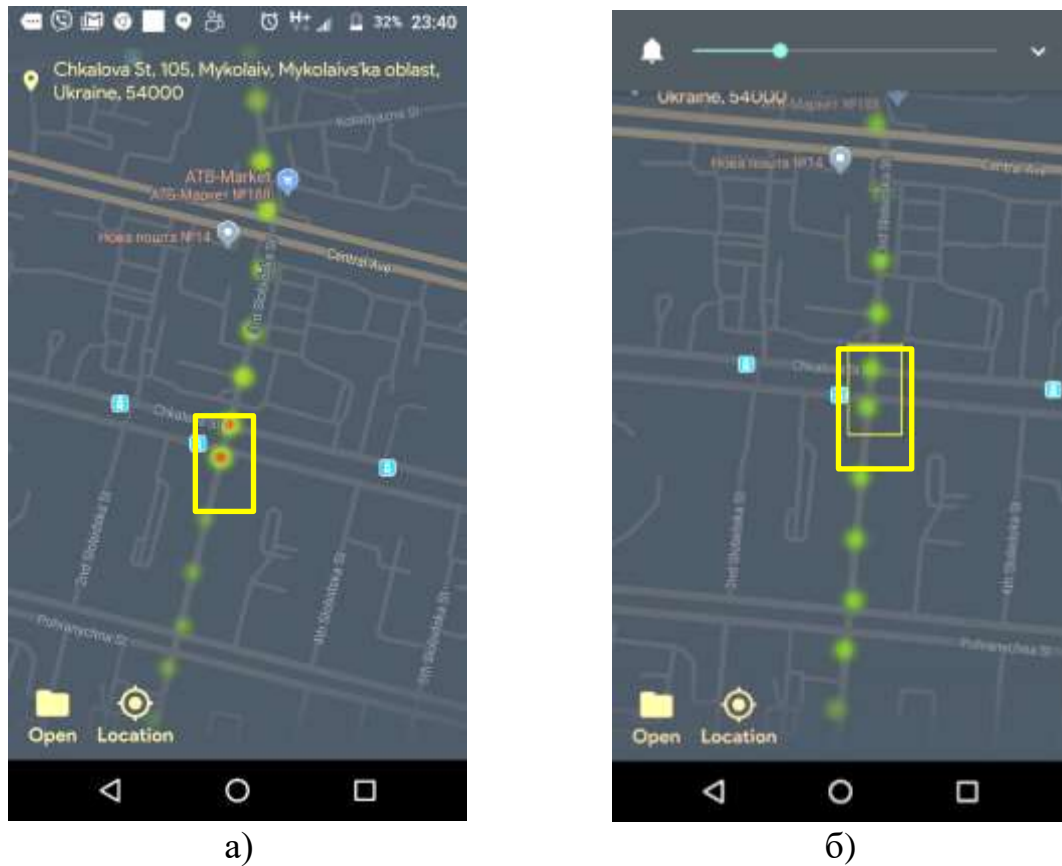


Рисунок 6.21 – Теплова карта з наведеним місцем пориву (а) на теплотрасі та його усунення (б)

Кнопка *Location* відповідає за поточне місцезнаходження вимірювального пристрою на БПЛА. Кнопка *Open* відповідає за відкриття файлу з бази даних, необхідного для побудови теплової карти.

Файл заповнювався за допомогою Bluetooth-порта результатами температурних вимірювань, виконаних за допомогою пірметра Testo 805i або датчика TX29DTH-IT.

З аналізу теплової карти на рис. 6.21, а можна побачити місце розташування витоку теплової енергії на підземній магістралі та точно визначити його географічне положення.

За даними розгорнутої інформаційно-вимірювальної КС можна зробити висновок, що вздовж теплотраси, після знайденого місця витоку, температура

над поверхнею підземної теплотраси знижена до рівня температури навколишнього середовища на дату проведення вимірювань.

Після проведеної комп'ютерної діагностики отримані дані були передані відповідним ремонтному підприємству. Розриття теплотраси по знайденим координатам пориву підтвердило факт аварії саме в зазначеному місці теплотраси, виявленому в результаті вимірів температури і відображеному на рис. 6.21, а. Червоний колір в центрі плями у прямокутнику відображає підвищену температуру. А на рис. 6.21, б – те ж саме географічне місце, але вже з ліквідованим поривом (див. подвійний прямокутник).

Переваги запропонованого методу полягають в тому, що ремонтна бригада може діяти незалежно від графіка роботи і місця розташування фахівців діагностичної бригади. Коли ремонтна бригада прибуває на місце відображеного на географічній мапі витоку теплової енергії, бригадир з будь-якого мобільного пристрою (смартфона, планшета й т. п.) авторизується на Firebase. При цьому може бути використаний профіль бригадира в будь-якій соціальній мережі – Google, Facebook, Twitter або ін.

Після отримання доступу до теплової карти теплотраси бригадир ремонтної бригади може порівняти отримані з хмарного сервісу GPS-координати з власними. Потім він має можливість точно поєднати розміщення ремонтного обладнання (екскаватор, помпу і т. п.) із зазначеним на тепловій карті місцем витоку теплової енергії.

Таким чином, проведено експериментальні дослідження розробленої інформаційно-вимірювальної КС на основі РММ з БПЛА для потреб міського житлово-комунального господарства щодо виявлення місць енерговитрат на міський підземній тепловій магістралі через аварію труб. Проведені дослідження підтвердили достатню точність результатів для розміщення ремонтного обладнання точно над місцем пориву теплотраси. Показана перспективність подальшого розвитку термографічного методу виявлення місць втрат теплової енергії за допомогою комп'ютерних систем і хмарних сервісів для підземних та висотних інженерних споруд.

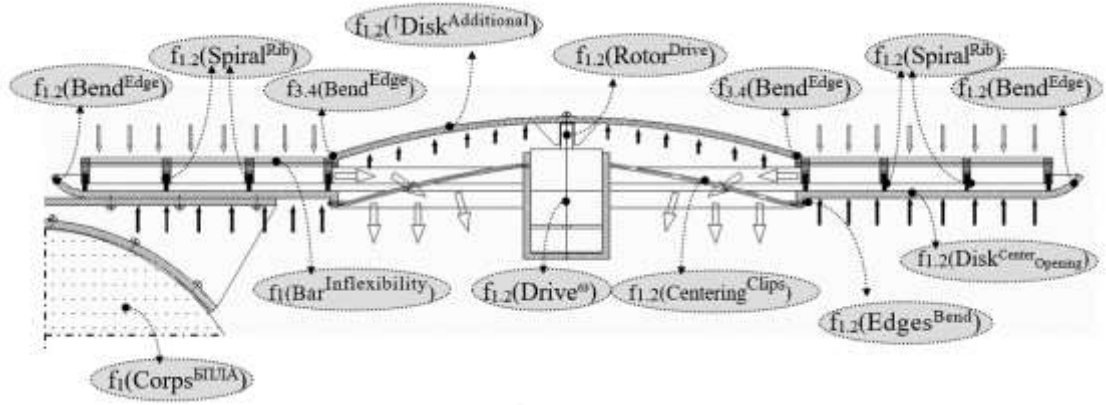
6.3 Створення перспективних функціональних компонентів БПЛА для суб-роїв РММ з подовженим часом життя

Одним з варіантів формування перспективних функціональних структур БПЛА, що призначені для повітряного спостереження з можливістю передачі інформації, отриманої бортовим обладнанням БПЛА, до КЦ в реальному часі, конструктивно можуть бути БПЛА роторного типу [353]. Подовження часу життя таких БПЛА можливо шляхом більш економного витрачання заряду акумуляторів за рахунок збільшення підйомної сили при підйомі.

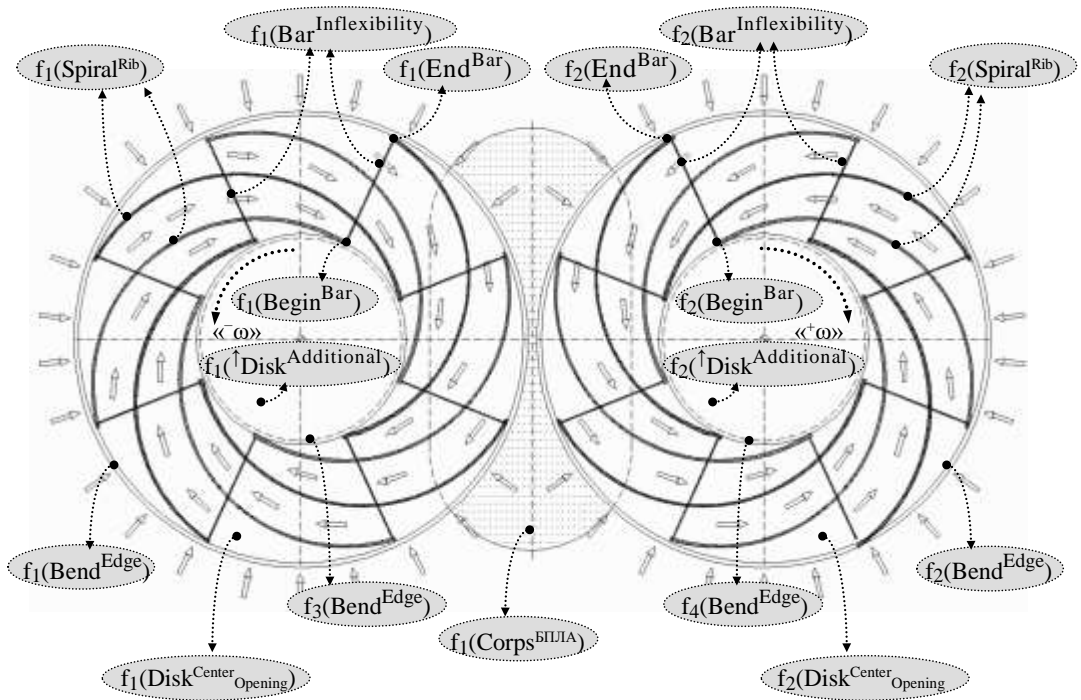
Один з таких варіантів зображений на рис. 6.22 [302]. Необхідно відмітити, що по обидві боки корпусу $f_1(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$ в його верхній частині зафіксовані два диски $f_{1,2}(\text{Disk}^{\text{Center}}_{\text{Opening}})$ з співвісним центральним отвором та з вигином $f_{1,2}(\text{Bend}^{\text{Edge}})$ на краю для їх жорсткості. Зазначені отвори виконані для прийому центробіжних повітряних потоків, які сформовані спіралеподібними ребрами $f_{1,2}(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$ (пластинами), нижні частини котрих позиційно розташовані на верхній поверхні дисків $f_{1,2}(\text{Disk}^{\text{Center}}_{\text{Opening}})$ для ефективного видалення повітря з їх поверхні та утворення на них пониженого тиску.

Оскільки зовнішні частини спіралеподібних ребер $f_{1,2}(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$ виконують процедуру обертання з підвищеною швидкістю « $\bar{\omega}$ » и « $^+\omega$ » в протилежних напрямках, і при цьому мають підвищене навантаження, тому рівномірно по колу розташовують стрижні жорсткості $f_{1,2}(\text{Bar}^{\text{Inflexibility}})$, а їх кінці $f_1(\text{End}^{\text{Bar}})$ закріплюють на зовнішніх частинах спіралеподібних ребер $f_{1,2}(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$.

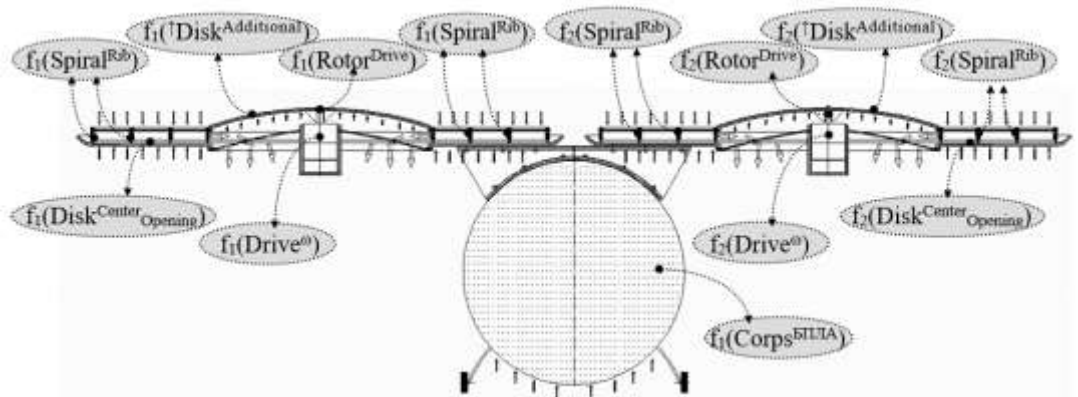
Початок стрижнів жорсткості $f_{1,2}(\text{Bar}^{\text{Inflexibility}})$ спільно з початком спіралеподібних ребер $f_{1,2}(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$ фіксують з вертикально орієнтованим вигином $f_{3,4}(\text{Bend}^{\text{Edge}})$ додаткового диска $f_{1,2}(\uparrow\text{Disk}^{\text{Additional}})$, як показано на рис. 6.22, а. При цьому додаткові диски $f_{1,2}(\uparrow\text{Disk}^{\text{Additional}})$ виконані з вертикальним вигином $f_{3,4}(\text{Bend}^{\text{Edge}})$. Нижню співвісну частину дисків фіксують до осі ротора $f_{1,2}(\text{Rotor}^{\text{Drive}})$, а корпус привода $f_{1,2}(\text{Drive}^{\omega})$ за допомогою центруючих стрижнів $f_{1,2}(\text{Centering}^{\text{Clips}})$ закріплюють на вертикально орієнтованих вниз краях вигину $f_{1,2}(\text{Edges}^{\text{Bend}})$ дисків $f_{1,2}(\text{Disk}^{\text{Center}}_{\text{Opening}})$.



а)



б)



в)

Рисунок 6.22 – Конструкція БПЛА для РММ: а – вид біляроторної частини, б – вид зверху; в – вид збоку

В результаті енергетичного моменту обертання ротора $f_{1,2}(\text{Rotor}^{\text{Drive}})$ привода $f_{1,2}(\text{Drive}^{\text{O}})$ він призводить в обертальний рух додаткові диски $f_{1,2}(\uparrow\text{Disk}^{\text{Additional}})$ спільно з спіралеподібними ребрами $f_{1,2}(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$. При цьому над верхньою поверхнею $f_{1,2}(\text{Disk}^{\text{Center}}_{\text{Opening}})$ мінімізується зовнішній тиск повітря, а під нижньою поверхнею основних дисків, так само як і під нижньою поверхнею додаткових дисків $f_{1,2}(\uparrow\text{Disk}^{\text{Additional}})$, активізується підвищений тиск повітря, що призводить до формування підйомної сили БПЛА.

БПЛА пропонуваної конструкції та комплектації має у складі корпус $f_1(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$, де розташоване обладнання, призначене для формування та управління зграю БПЛА та ведення повітряної розвідки (рис. 6.23).

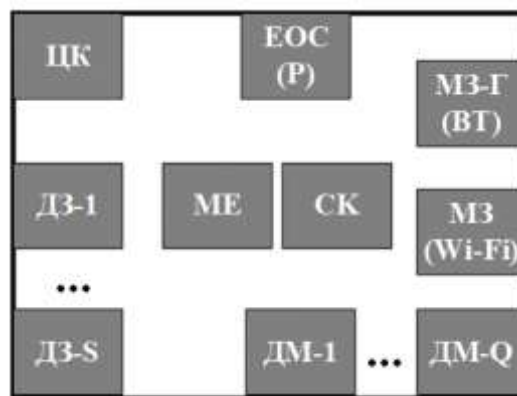


Рисунок 6.23 – Обладнання на борту кожного БПЛА для РММ:

СУ – система управління;

МЕ – модуль електроживлення;

МЗ – модуль зв'язку (BlueTooth, Wi-Fi, RF тощо);

ЕОС (Р) – електронно-оптична система (радар);

ДЗ – датчик попередження зіткнень (виявлення перешкод);

ДМ – датчик моніторингу;

ЦК – цифрова камера

Слід відмітити, що в суб-рої (зграї), сформованому з БПЛА із запропонованими модифікаціями, необхідно здійснювати управління кожним окремим БПЛА, оскільки зовнішні впливи (вітер, механічні перешкоди тощо) для кожного з об'єктів будуть різними. Тому при формуванні суб-рою з єдиним

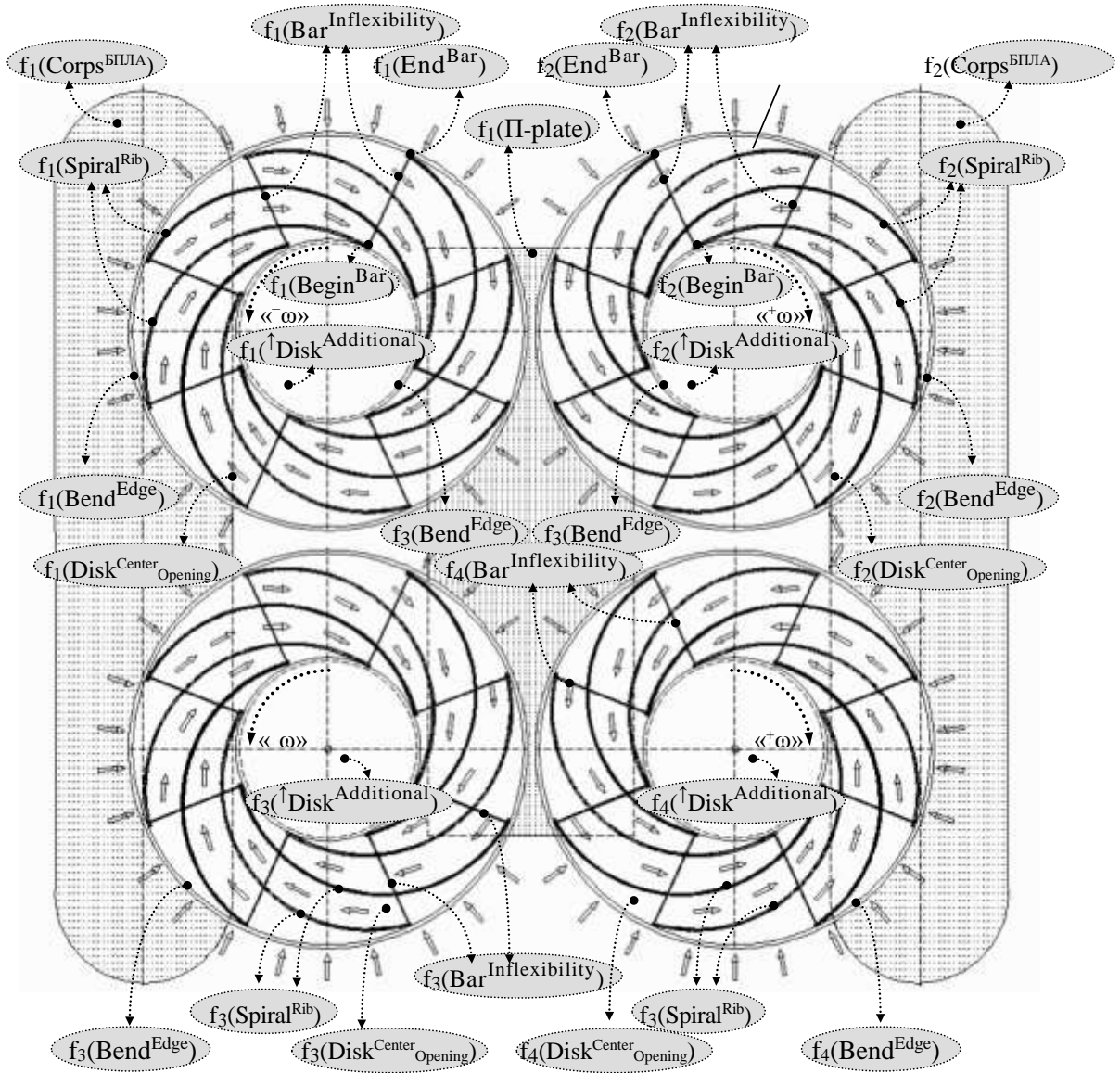
загальним завданням доцільно розробити єдину жорстку конструкцію з кількох БПЛА, для котрих можливо синтезувати один маршрут та приймати єдине рішення при зовнішніх впливах.

Другий перспективний варіант функціональної структури БПЛА зображений на рис. 6.24. Особливістю пропонованого варіанту формування окремого суб-рою БПЛА є з'єднання двох корпусів БПЛА $f_1(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$ і $f_2(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$ в єдину жорстку конструкцію. В кожному з БПЛА розташовують необхідне обладнання енергоживлення, комп'ютерні компоненти та радіолокаційні пристрої для організації спостереження за наземними об'єктами з визначенням їх координат і передачею їх на головний БПЛА або наземний КЦ.

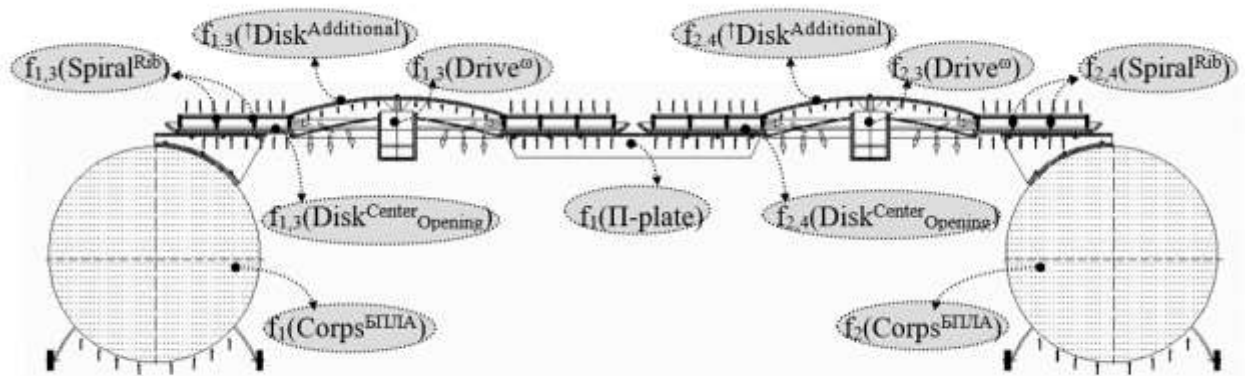
При цьому в початку та в кінці верхньої частини обох корпусів БПЛА $f_1(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$ і $f_2(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$ послідовно фіксують по два тонких диски з центральними співвісними отворами $f_1(\text{Disk}^{\text{Center}_{\text{Opening}}})$, $f_3(\text{Disk}^{\text{Center}_{\text{Opening}}})$, $f_2(\text{Disk}^{\text{Center}_{\text{Opening}}})$ і $f_4(\text{Disk}^{\text{Center}_{\text{Opening}}})$, в котрих зовнішні краї виконані з вигином $f_1(\text{Bend}^{\text{Edge}})$, $f_3(\text{Bend}^{\text{Edge}})$, $f_2(\text{Bend}^{\text{Edge}})$ і $f_4(\text{Bend}^{\text{Edge}})$ для їх жорсткості. Між тонкими дисками з центральними співвісними отворами закріплюють спільну П-образну пластину $f_1(\text{П-plate})$ для формування єдиної жорсткої конструкції суб-рою БПЛА.

При цьому поздовжні краї П-образної пластини $f_1(\text{П-plate})$ позиційно розташовують між центральними співвісними отворами $f_1(\text{Disk}^{\text{Center}_{\text{Opening}}})$, $f_3(\text{Disk}^{\text{Center}_{\text{Opening}}})$, $f_2(\text{Disk}^{\text{Center}_{\text{Opening}}})$ і $f_4(\text{Disk}^{\text{Center}_{\text{Opening}}})$ послідовності цих чотирьох дисків, що призводить до підвищення маневреності спарених БПЛА.

Підвищення маневреності зумовлене тим, що, якщо швидкість обертання « ω^- » и « ω^+ » спіралеподібних ребер $f_3(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$ і $f_4(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$, котрі розташовані в кінці верхньої частини обох корпусів БПЛА $f_1(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$ і $f_2(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$, буде перевищувати аналогічну швидкість обертання спіралеподібних ребер $f_1(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$ і $f_2(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$, котрі розташовані на початку верхньої частини цих корпусів $f_1(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$ і $f_2(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$, тоді БПЛА буде переміщуватися у прямому напрямку. Якщо ж зазначена швидкість обертання « ω^- » и « ω^+ » спіралеподібних ребер буде менше аналогічної, то БПЛА буде переміщатись в зворотному напрямку.



а)



б)

Рисунок 6.24 – Суб-рій у вигляді моноконструкції зі спарених БПЛА:

а – вид зверху, б – вид збоку

Для розвороту БПЛА в горизонтальній площині необхідно підвищувати швидкість обертання спіралеподібних ребер $f_1(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$ і $f_4(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$ або $f_2(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$ і $f_3(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$, котрі розташовані по діагоналі. При цьому слід зауважити, що зовнішні частини спіралеподібних ребер $f_{1-4}(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$ виконують процедуру обертання з підвищеною швидкістю « $\bar{\omega}$ » і « $^+\omega$ » та попарно обертаються у протилежних напрямках, зазнаючи при цьому підвищене навантаження. Тому рівномірно по колу доцільно розташувати стрижні жорсткості $f_{1-4}(\text{Bar}^{\text{Inflexibility}})$, їх кінці $f_1(\text{End}^{\text{Bar}})$ закріпити на зовнішніх частинах спіралеподібних ребер $f_{1-4}(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$, а початок стрижнів жорсткості $f_{1-4}(\text{Bar}^{\text{Inflexibility}})$, спільно з початком спіралеподібних ребер $f_{1-4}(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$, зафіксувати з вертикально орієнтованими вниз вигинами $f_{1-4}(\text{Bend}^{\text{Edge}})$ додаткових опуклих вертикально вверх дисків $f_{1-4}(\uparrow\text{Disk}^{\text{Additional}})$.

Два поздовжньо послідовних диски $f_{1,3}(\text{Disk}^{\text{Center}}_{\text{Opening}})$ позиційно фіксують з одного боку на верхній частині корпусу $f_1(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$ БПЛА, а з іншого боку закріплюють на верхній поверхні П-образної пластини $f_1(\text{P-plate})$, як показано на рис. 6.24, б.

При цьому додаткові диски $f_{1,3}(\uparrow\text{Disk}^{\text{Additional}})$ виконані з вертикальним вигином, нижню співвісну частину котрих фіксують до осі ротора $f_{1,3}(\text{Rotor}^{\text{Drive}})$, а корпус привода $f_{1,3}(\text{Drive}^{\omega})$ за допомогою центруючих стрижнів $f_{1,3}(\text{Centering}^{\text{Clips}})$ закріплюють на вертикально орієнтованих вниз краях вигину $f_{1,3}(\text{Edges}^{\text{Bend}})$ дисків $f_{1,3}(\text{Disk}^{\text{Center}}_{\text{Opening}})$. В результаті енергетичного моменту обертання ротора $f_{1,3}(\text{Rotor}^{\text{Drive}})$ привода $f_{1,3}(\text{Drive}^{\omega})$ він призводить в обертальний рух додаткові диски $f_{1,3}(\uparrow\text{Disk}^{\text{Additional}})$ спільно з спіралеподібними ребрами $f_{1,3}(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$, над верхньою поверхнею $f_{1,3}(\text{Disk}^{\text{Center}}_{\text{Opening}})$, мінімізуючи зовнішній тиск повітря. Під нижньою поверхнею ребер, так само, як і під нижньою поверхнею додаткових дисків $f_{1,3}(\uparrow\text{Disk}^{\text{Additional}})$, активізується підвищений тиск повітря, що призводить до формування підйомної сили БПЛА.

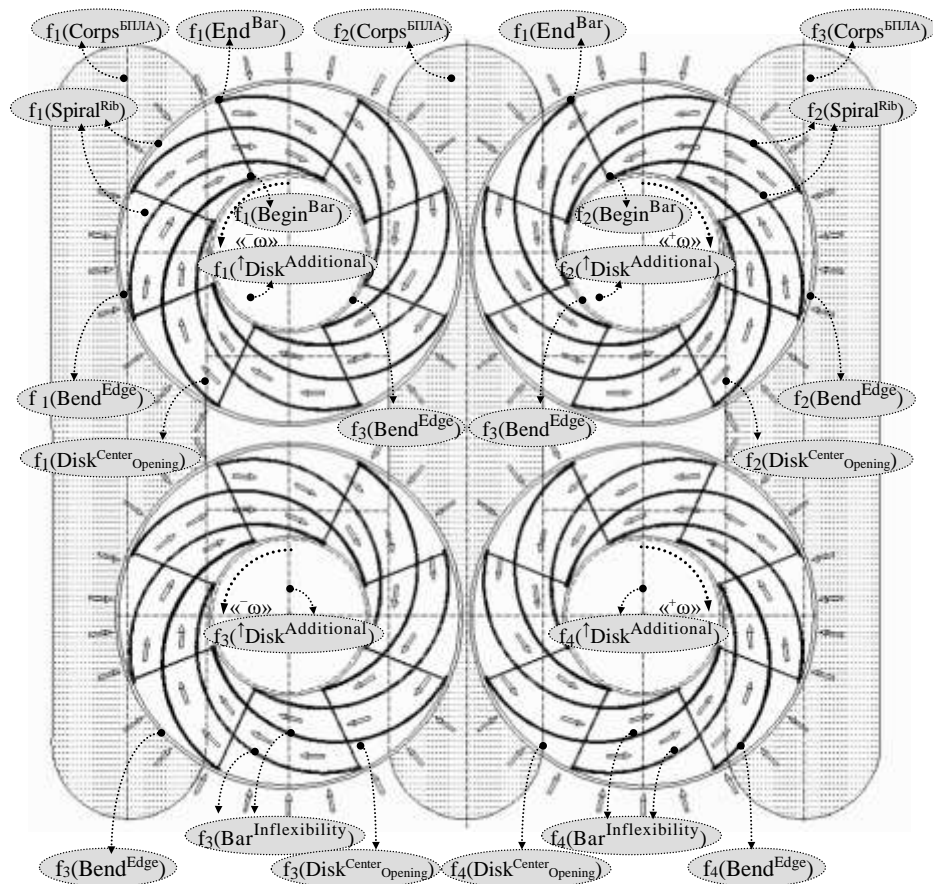
При розширенні території виконуваного завдання для суб-рою БПЛА і відповідного збільшення кількості комп'ютерних компонентів, датчиків, ЕОС в такому суб-рої необхідно враховувати обмежений запас потужності акумулятора

БПЛА роторного типу. В такому випадку має сенс збільшити кількість БПЛА в складі одного суб-рою і розподілити обладнання відповідно до споживаної потужності між такими БПЛА одного суб-рою.

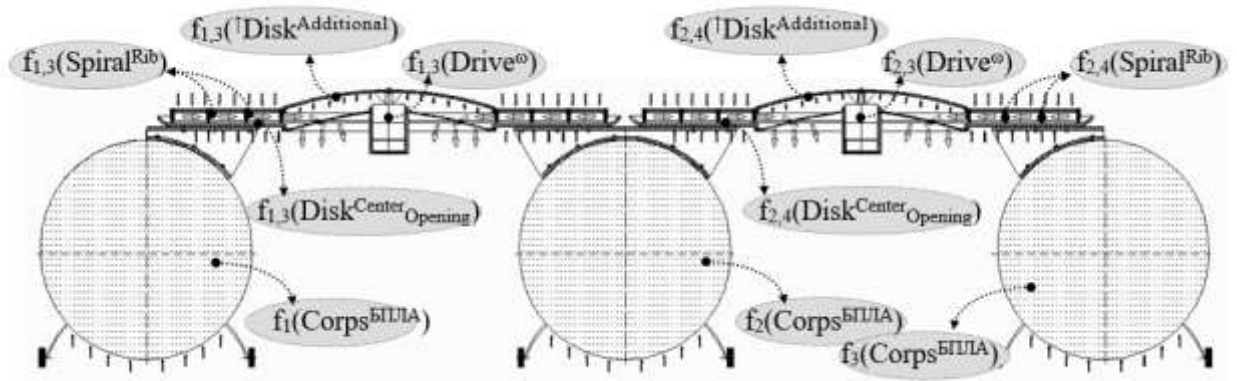
Наприклад, можна побудувати перспективний варіант функціональної структури суб-рою БПЛА єдиної поліконструкції на основі тріади БПЛА, як показано на рис. 6.25 [301].

Особливістю такого рішення є наявність трьох корпусів БПЛА $f_1(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$, $f_2(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$ і $f_3(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$, в кожному з яких розташовують необхідне обладнання (див. вище).

При цьому в початку і в кінці верхньої частини трьох корпусів БПЛА $f_1(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$, $f_2(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$ і $f_3(\text{Corps}^{\text{БПЛА}})$ послідовно фіксують по два тонких диски з центральними співвісними отворами аналогічно конструкції суб-рою на основі спарених БПЛА. Переміщення такої поліконструкції буде здійснюватися аналогічно переміщенню суб-рою на основі спарених БПЛА.



a)



б)

Рисунок 6.25 – Функціональна структура суб-рою єдиної поліконструкції на основі тріади БПЛА: а – вид зверху, б – вид збоку

Для розвороту суб-рою єдиної поліконструкції на основі тріади БПЛА в горизонтальній площині необхідно підвищувати швидкість обертання спіралеподібних ребер $f_1(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$ і $f_4(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$ або $f_2(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$ і $f_3(\text{Spiral}^{\text{Rib}})$ таким же чином, як це описано для суб-рою на основі спарених БПЛА.

У розглянутій конструктивній тріаді формування підйомної сили суб-рою єдиної поліконструкції на основі тріади БПЛА відбувається аналогічним чином, як і для конструкції суб-рою на основі спарених БПЛА. Розроблені конструктивні рішення БПЛА з підвищеною ефективністю формування підйомної сили БПЛА для підйому і переміщення предметів у повітряному середовищі дозволяють суттєво економити заряд акумуляторів на зльоті, й тим самим подовжувати життєвий цикл БПЛА.

У всіх наведених конструкціях БПЛА може бути передбачена автоматична система відстрілу блока запису інформації, що підвищує надійність її збереження під час виникнення критичної ситуації, яка може призвести до втрати не лише апарата, а й зібраної інформації [354].

Блок оснащений автономним живленням з системою геопозиціонування і з'єднання з КЦ, який в разі відстиковки блока отримує дані про його місцезнаходження та приймає рішення щодо важливості зібраної інформації і шляхів її повернення. Вбудована парашутна система забезпечує плавну посадку

безпілотного літального апарата під час вертикального його зниження, що надає можливість без ушкоджень посадити блок з модулем пам'яті на місцевість.

6.4 Порівняння запропонованих методів та засобів з існуючими рішеннями

Впровадження запропонованих в роботі рішень дозволяє забезпечити автономну поведінку БПЛА при критичному застосуванні, збільшити рівень безпеки інформації про їх місцезнаходження, суттєво зменшити енергоспоживання комп'ютерних компонентів на борту БПЛА, збільшити час життя ШГKM.

У табл. 6.3 наведено порівняння деяких показників ШГKM критичного застосування з відомими рішеннями, зазначені рівні наукової новизни запропонованих рішень.

Таблиця 6.3 – Порівняння запропонованих методів та засобів з існуючими рішеннями

Вирішена задача	Наукова новизна¹⁾	Покращений показник	Переваги показників, досягнуті у дисертаційній роботі
1. Проведений аналіз сучасного стану та шляхів удосконалення методів створення та функціонування гетерогенних комп'ютерних мереж на основі БПА	–	Розроблено узагальнену класифікацію структур мережевої взаємодії об'єктів такої комп'ютерної системи за ознаками гетерогенності, швидкодинамічності, критичності застосування, централізованості управління з КЦ, розбиття на суброї, наявності головних («лідуючих») БПЛА та характеристик їх апаратних компонентів	Обґрунтовані шляхи вирішення задач дослідження

Продовження таблиці 6.3

Вирішена задача	Наукова новизна ¹⁾	Покращений показник	Переваги показників, досягнуті у дисертаційній роботі
2. Розроблені теоретичні основи опису руху БПЛА з використанням засад броунівського руху з урахуванням дрейфу та розміру БПЛА при їх ройовому використанні	«У» «М» Ланжевена, «ВЗ» «М» визначення часу життя ШГKM за рахунок обчислення траєкторії руху БПЛА	Похибка визначення довжини траєкторії	Зменшена на 8,2 %
3. Розроблений метод визначення площі функціонування зграї БПЛА з урахуванням зміни топології РММ та розбиттям на суб-рої	—	% необстеженої площі	Точність визначення покращена на 15,1 %
	«ВЗ» «М» синтезу суб-оптимальних маршрутів суб-роїв	Час обстеження території	Зменшений на 11,6%
4. Розроблені засоби обліку великорозмірних об'єктів за допомогою РММ з гарантованою доставкою інформації та удосконаленням захисту даних	«НПР» «М» гарантованої доставки інформації	Синхронізацію КФО	Відстрочений до поновлення зв'язку
	«У» «М» підвищення криптостійкості	Рівень захищеності даних щодо місцезнаходження БПЛА	Закриття GPS-координат БПЛА у стегоконтейнері

Продовження таблиці 6.3

Вирішена задача	Наукова новизна ¹⁾	Покращений показник	Переваги показників, досягнуті у дисертаційній роботі
5. Розроблені теоретичні основи аналізу та інтелектуалізації системи управління навантаженням БПЛА технологічними завданнями з розподілом їх між ядрами однокристального процесора (CPU та/або GPU) БПЛА з вивільненням окремого ядра для задач управління польотом, відключенням неперіоритетних пристроїв та передаванням енергії між КФО за технологією PoWiFi	«НПЗ» «ММ» диспетчеризації завдань в CPU БПЛА з вивільненням окремого ядра для задач управління	Коефіцієнт навантаженості CPU	Зменшений на 23 %
	«ВЗ» «М» усунення дублювання виконання функцій БПЛА за рахунок розроблених засобів управління режимами роботи неперіоритетних модулів БПЛА	Енергоспоживання КФО	Зменшене на 15,7 %
	«НПР» «М» між КФО на основі технології PoWiFi	Енергоспоживання КФО за рахунок відключення неперіоритетних пристроїв на БПЛА	Зменшене на 11,2%
6. Розробити комп'ютерні системи з використанням ШГКМ для вирішення прикладних завдань	—	КС інформування капі-тана контейнеровоза про кількість контейнерів, що перенесені через борт судна	Не потрібне підключення до комп. мережі порту та Інтернету

Кінець таблиці 6.3

Вирішена задача	Наукова новизна ¹⁾	Покращений показник	Переваги показників, досягнуті у дисертаційній роботі
		КС виявлення місць витоку теплової енергії з прихованих об'єктів	Збільшена точність позиціонування засобів ремонту над місцем витоку
		Час життя БПЛА	Подовжений шляхом більш економного витрачання заряду акумуляторів за рахунок збільшення підйомної сили при підйомі

¹⁾ Використана така нотація рівнів наукової новизни: вперше запропонований – «ВЗ», удосконалений – «У», набув подальшого розвитку – «НПР» Метод «М» або Матмодель «ММ»

Крім того, експериментальні дослідження прикладних рішень, розроблених на базі запропонованих в роботі теоретичних основ, методів та засобів створення та функціонування ШГКМ, показали, що отримані в роботі положення забезпечують підвищення ефективності функціонування та подовження часу життя різноманітних об'єктів КФС на основі БПЛА, вузлів БПЛА з різними конструкціями та схемотехнічними рішеннями, поліпшують умови виконання виробничих завдань у різних галузях.

Враховуючи вищенаведене, можна стверджувати, що у дисертаційному дослідженні вирішена важлива науково-технічна проблема створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування, поставлена у роботі мета досягнута.

Висновки до Розділу 6

1. Розроблена комп'ютерна система на основі локальної ШГКМ для обліку великорозмірних вантажів, що дозволяє отримувати у режимі реального часу інформацію щодо кількості вантажів, які перетнули зазначений пункт обліку. Наведений приклад розгортання зазначеної КС для інформування капітана контейнеровоза про кількість контейнерів, що перенесені через борт судна портокраном.

2. Розроблена КС на основі РММ з термодатчиками на борту рухомих об'єктів, яка надає перспективи для подальшого розвитку термографічного методу виявлення місць втрат теплової енергії за допомогою комп'ютерних систем і хмарних сервісів для підземних та висотних інженерних споруд.

3. Розроблені конструктивні рішення перспективних функціональних компонентів БПЛА з подовженим життєвим циклом за рахунок більш економного витрачання заряду акумуляторів під час формування підйомної сили БПЛА.

4. Розроблені структурні та конструктивні рішення малогабаритних БПЛА, в яких за рахунок впровадження підсистеми катапультування блоків пам'яті та визначення GPS-координат БПЛА передбачено при критичному застосуванні відстріл зазначених модулів задля непопадання до конкурентних осіб з оповіщенням КЦ про координати падіння зазначеного модуля.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну проблему створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування (ШГКМ) на базі безпілотних літальних апаратів. У роботі проаналізовано загальні питання підвищення ефективності функціонування та подовження часу життя різноманітних об'єктів кібер-фізичної системи (КФС) на основі БПЛА, вузлів БПЛА з різними конструкціями та схемотехнічними рішеннями. Виконаний розвиток існуючих та створені нові алгоритми, здатні зменшити обсяг обчислювальної потужності, засобів зв'язку і втручання людини, необхідних для виконання безпілотними літальними апаратами мікро-завдань, таких як запобігання зіткнень у критичних ситуаціях, у т. ч. у навколишньому середовищі, перевантаженому перешкодами. Розглянуті особливості поліпшення захищеності даних, що передаються між компонентами КФС бездротовими каналами зв'язку, питання рівномірного навантаження компонентів на БПЛА у керованому або автономному режимах функціонування.

При цьому отримано такі основні теоретичні й практичні результати:

1. На основі проведеного аналізу структур мережевої взаємодії об'єктів гетерогенних мереж розкрито переваги використання централізованого управління всією групою пристроїв при невеликій кількості БПЛА та розроблення методів ройового управління зграєю БПЛА, розділеною на суб-рої, при збільшенні кількості БПЛА. Обґрунтовано, що найбільш перспективним є розроблення методів та алгоритмів перевизначення задач та планування маршрутів БПЛА з урахуванням швидкодинамічних властивостей РММ та досягненням самозагоєння мережевої структури суб-рою.

2. Удосконалено метод моделювання траєкторії БПЛА на основі стохастичних диференціальних рівнянь Ланжевена за рахунок застосування теоретичних засад «прогулянок Лєві» та «польотів Лєві», що дозволило прогнозувати поведінку групи (зграї, рою) БПЛА з урахуванням у траєкторії зовнішніх збурень на подобу броунівського руху, а також перешкоди руху.

Вперше для визначення траєкторії БПЛА застосована фінансова модель Блека-Шоулза, яка дозволила сформулювати точне рішення рівняння Ланжевена для опису траєкторії БПЛА. Чисельне рішення отримане в пакеті MATLAB за допомогою метода Ейлера-Маруями, найменш вимогливого до обчислювальних ресурсів комп'ютерних систем. Показано, що середній відсоток похибки такої моделі складає 8,2 %, тому запропоновану вдосконалену модель доцільно застосовувати до прогнозування траєкторії руху БПЛА.

3. Запропоновано метод визначення часу життя ШГКМ за рахунок обчислення траєкторії руху з урахуванням відхилень через зовнішні збурення та механічні перешкоди, що надає можливість своєчасно знімати дрони з маршруту та відправляти на базу для підзарядки батарей. Зазначений підхід здатний попередити втрату дрона та уточнити паспортний час роботи для БПЛА, що живляться від акумуляторних батарей, в залежності від особливостей експлуатації.

4. Запропоновано метод визначення площі функціонування зграї БПЛА на основі прямокутника Брахмагупти з урахуванням зміни топології РММ на основі зграї БПЛА, що дозволило підвищити точність визначення необстеженої площі на 15,1 % завдяки урахуванню більшої скупченості зграї ніж прямокутник Брахмагупти через необхідність забезпечення надійного обміну даними між БПЛА.

5. Удосконалено метод розбиття гетерогенної зграї БПЛА на суб-рої з вирішенням задачі комівояжера (TSP) для кожного суб-рою окремо в обмежених просторових коридорах з конкатенацією 2D-рішень TSP в загальне рішення, що дозволило на 11,6 % прискорити обстеження території суб-роєм з 6 БПЛА.

6. Запропоновано метод синтезу суб-оптимальних маршрутів суб-роїв БПЛА на основі нейронної мережі Хопфілда, суміщеної з польотною картою, що дозволило уникнути дублювання виконання завдань у будь-яких точках території та надало можливість реалізувати механізм «самозагоєння» рою у межах зграї дронів за рахунок перевизначення завдань підгруп як кібер-фізичної системи у разі втрати декількох дронів під час критичного застосування.

7. Набув подальшого розвитку метод гарантованої доставки інформації між КФО з використанням трансферних вузлів та хмарних сервісів (наприклад, Google FireBase), за рахунок зміни протоколу взаємодії між КФО шляхом додання параметрів режиму функціонування БПЛА та умов їх настання. Це дозволяє при втраті зв'язку відстрочити синхронізацію КФО до поновлення зв'язку та суттєво підвищує безпеку поточної інформації щодо функціонування БПЛА у разі перехоплення Об'єкта сторонніми особами.

8. Удосконалено метод підвищення криптостійкості передаваних повідомлень шляхом стеганографічного закриття GPS-координат БПЛА у відкриті дані, які передаються за допомогою протоколу MAVLink відкритими каналами зв'язку, що дозволяє при перехопленні трафіка скрити у переданій інформації дані щодо місцеположення БПЛА. Проведене натурне та комп'ютерне моделювання розробленої системи. Визначений час повного циклу створення та обробки повідомлення у каналі зв'язку РММ в залежності від вибраних комп'ютерних компонентів.

9. Розроблені алгоритмічні та схемотехнічні рішення великорозмірних вантажів із запобіганням подвійної реєстрації вантажу та реєстрації руху сторонніх об'єктів за рахунок знаходження градієнту зображення цільового об'єкта з використанням у якості реєстраторів мобільних пристроїв з обмеженими обчислювальними можливостями, що переносяться БПЛА.

10. Набула подальшого розвитку математична модель диспетчеризації завдань обчислювачів об'єктів ШГКМ з вивільненням окремого ядра CPU для процесів управління польотом, що дозволило зменшити енергоспоживання БПЛА та розробити алгоритм оптимального навантаження технологічними завданнями ядер однокристального процесора обчислювальної плати (CPU та/або GPU) на кібер-об'єкті зі зменшенням коефіцієнта навантаженості CPU на 23 % для чотириядерного процесора Qualcomm Snapdragon 400, на якому базуються сучасні моделі БПЛА. Показано, що прив'язка процесів до трьох ядер замість чотирьох на 15,7 % зменшує енергоспоживання БПЛА без суттєвого перегріву процесора у порівнянні з режимом виконання завдання за стандартним

планувальником завдань ОС.

11. Запропоновано метод усунення дублювання виконання технологічних функцій БПЛА за рахунок розроблених засобів управління режимами роботи модулів БПЛА. Це дозволяє зменшити енерговитрати ШГКМ шляхом віддаленого бездротового відключення від енергоспоживання неперіоритетних пристроїв та/або ушкоджених функційних модулів на борту БПЛА в межах одного суб-рою, що дозволяє зекономити до 11,2 % енергії батареї БПЛА.

12. Набув подальшого розвитку метод бездротового передавання енергії між КФО на основі технології PoWiFi відповідно до розробленої циклограми за рахунок чергування інтервалів передачі даних та передавання енергії з використанням різних груп WiFi-каналів, які не перетинаються, згідно з правилами доменів FCC та ETSI, що дозволяє здійснити підзарядку акумуляторів БПЛА без повернення на базу та збільшує час життя ШГКМ.

13. Розроблені конструктивні рішення функціональних компонентів БПЛА з подовженим життєвим циклом за рахунок більш економного витрачання заряду акумуляторів під час формування підйомної сили БПЛА.

14. Розроблено структурні та конструктивні рішення малогабаритних БПЛА, в яких за рахунок впровадження підсистеми катапультування блоків пам'яті та визначення GPS-координат БПЛА передбачено при критичному застосуванні відстріл зазначених модулів задля непопадання до конкурентних осіб з оповіщенням командного центру про координати падіння модуля.

15. Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено:

- на контейнеровозі «CSCL Uranus» (zareєстрований у Hong Kong);
- у департаменті житлово-комунального господарства (ЖКГ)

Миколаївської міської ради;

- на підприємстві ЖКГ ТОВ «Добробут» (м. Миколаїв);
- на підприємстві ТОВ «Схід-Захід-Енерго» (м. Миколаїв);

– у науково-дослідних роботах, які виконувались в Інституті імпульсних процесів та технологій НАН України та в Чорноморському національному університеті ім. Петра Могили;

– у навчальному процесі Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

Слід зазначити, що більшість рішень, отриманих в дисертаційному дослідженні для БПЛА, є працездатними та ефективними для інших типів БПА, що пересуваються в іншому, не тільки повітряному, середовищі.

Результати дисертаційної роботи можуть бути запропоновані для використання науковими організаціями, підприємствами й установами, що займаються розробленням, впровадженням та експлуатацією швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування з метою підвищення ефективності та збільшення часу їх функціонування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 15-th International Workshop on Heterogeneous Wireless Networks (HWISE–2019). Kunibiki Messe, Matsue, Japan, March 27–29, 2019. URL: <http://voyager.ce.fit.ac.jp/conf/hwise/2019/>.
2. 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi. *Technical White Paper*. Cisco Systems Incorp. San Jose, CA, USA : 2014. URL: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-713103.pdf.
3. Ab Aziz N. A., Ibrahim Z. Asynchronous particle swarm optimization for swarm robotics. *Procedia Engineering*. 2012. No. 41. P. 951–957. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.268.
4. Ademoye T. A., Davari A., Cao W. Three-dimensional obstacle avoidance maneuver planning using mixed integer linear programming. *Robotics and Applications (RA'2006)* : Proceedings of the Int. Conf. / Ed. M. H. Hamza, Honolulu, 14–16 Aug., 2006. ACTA Press, 2006. 210 p.
5. Advanced UAVs & Flight Control Systems. URL: <http://sky-drones.com>.
6. Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the art and the road to autonomy / Ed. K. P. Valavanis. Springer Science & Business Media, 2008. 544 p.
7. Aerial Construction. *Research D'Andrea* / Institute for Dynamic Systems and Control. URL: <http://www.idsc.ethz.ch/research-dandrea/research-projects/aerial-construction.html>.
8. Alami R., Fleury S., Herrb M., et al. Multi Robot Cooperation in the Martha Project : Report / Laboratory for Analysis and Architecture of Systems (LAAS-CNRS), Toulouse, France, 1998. 21 p. URL: <https://homepages.laas.fr/felix/publis-pdf/ieee-ram98.pdf>.
9. Amin I. N., Boskovic J. D., Mehra R. K. A fast and efficient approach to path planning for unmanned vehicles. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. and Exhibit* : Proceedings of the Int. Conf., Colorado, 21-24 Aug., 2006.
10. Antoshchuk S. G., Maksymov O. M., Wendl M. Autopilot model for returning an unmanned aerial vehicle to its starting point in case of electromagnetic

noise. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2017. Is. 3 (53). P. 94-101. URL: <http://www.pratsi.opu.ua/app/webroot/articles/1517479093.pdf>.

11. APM 2.6 APM flight controller board for multicopter ARDUPILOT MEGA 2.6 Version. URL: http://www.nyplatform.com/index.php?route=product/product&product_id=1365.

12. Apptest maps 3d watch and download. URL: <http://hdvidzpro.mobi/list/apptest-maps-3d/page=CBQQAQ>.

13. Augugliaro F., Zarfati E., Mirjan A., D'Andrea R. Knot-tying with flying machines for aerial construction. *Intelligent Robots and Systems (IROS)* : Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf., Hamburg, Germany, 28 Sept.–2 Oct., 2015. P. 5917–5922. DOI: 10.1109/IROS.2015.7354218.

14. Auke J. I., Alcherio M., Aude B., et al. Collaboration through the exploitation of local interactions in autonomous collective robotics. The stick pulling experiment. *Auton Robot*. 2001. No. 11 (2). P. 149–171.

15. Austin R. Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment. Chichester, West Sussex, UK : Wiley, 2010. 365 p.

16. Autopilot for DJI: Overview. URL: <https://developer.dji.com/showcase/c394119cb61f9d8b2d49f2b6af92e4c8/>.

17. AVR Studio 5.0. URL: <http://microsin.net/programming/avr/avrstudio-all-versions.html>.

18. Bahgec I E., Sahin E. Evolving aggregation behaviors for swarm robotic systems: a systematic case study. *Proceedings of IEEE Swarm intelligence symposium*. 2005. P. 333–340. DOI: 10.1.1.187.7579.

19. Balch T. Communication, diversity and learning: cornerstones of swarm behavior. *Swarm Robotics: Lecture Notes in Computer Science*. 2005. Vol. 3342. P. 21–30.

20. Bandurian A. Wi-Fi, the unobvious and overlooked: Power. *Technical Blog*. Publ. 2014, Feb. 16. URL: <https://arsenb.wordpress.com/2014/02/16/wi-fi-the-unobviousand-overlooked-details-part-1/>.

21. BCM4330 – Single Chip IEEE 802.11™ a/b/g/n MAC/Baseband/Radio with Integrated Bluetooth® 4.0 + HS and FM Transceiver : Preliminary Data Sheet. URL: <http://linux-sunxi.org/images/0/05/4330-DS206-R.pdf>.
22. Bekey G. A. Autonomous robots: from biological inspiration to implementation and control. MIT Press, 2005. 577 p.
23. Bello-Ochende T., Liebenberg L., Meyer J. P. Constructal cooling channels for micro-channel heat sinks. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 50, Is. 21–22. P. 4141–4150. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.019.
24. Benchoff B. Hijacking drones with a MAVLink exploit. Publ. Oct. 15, 2015. URL: <https://diydrones.com/profiles/blogs/hijacking-quadcopters-with-a-mavlink-exploit>.
25. Sastry K. R. S. Brahmagupta Quadrilaterals. *Forum Geometricorum*. 2002. Vol. 2. P. 167–173.
26. Bhojani F. For good or bad, intelligent, swarming nanobots are the next frontier of drones. Publ. May 21, 2014. URL: https://motherboard.vice.com/en_us/article/qkvkgd/why-the-us-military-is-funding-tiny-autonomous-flying-robots.
27. Black-Scholes model. Publ. Summer, 2007 [Stanford University, CA, USA]. URL: https://stanford.edu/~xing/Stat243/slides_04_bs_NoPDE.pdf.
28. Blangé M. J., Karkowski I. P., Vermeulen B. C. B. Service discovery in heterogeneous wireless networks. *Wireless Ad-Hoc Networks : 2004 International Workshop*. Oulu, Finland, 31 May –3 June 2004. P. 295–299. Conference code: 66088.
29. Bortoff S. A. Path planning for UAVs. *American Control Conf. : Proceedings of the Conf.*, Chicago, Illinois, June 2000. Vol. 1(6). P. 364–368.
30. Braccini C., Cocurullo F., Lavagetto F. A fast algorithm for high quality vector quantization codebook design, *Image Analysis and Processing (ICIAP'95) : Proceedings of the 8th Int. Conf.*, London, UK, 1995. P. 643–648.
31. Burlachenko I., Zhuravska I., Musiyenko M. Devising a method for the active coordination of video cameras in optical navigation based on multi-agent

approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1, No. 9 (85). P. 17–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.90863.

32. Chakos B. Here's how. *PCWorld*. 2013. P. 89.

33. Chen F. China shows off drone brigade at Guangzhou Fortune Forum gala. *Asia Times*. Publ. Dec. 8, 2017. URL: <https://cms.ati.ms/2017/12/china-shows-off-drone-brigade-guangzhou-fortune-forum-gala/>.

34. Child J. FPGA Boards and systems boost UAV payload compute density. *The Journal of Military Electronics & Computing*. 2009, Feb. URL: <http://www.cotsjournalonline.com/articles/view/100910>.

35. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photo-grammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. Vol. 92. P. 79–97. DOI: 10.1015/j.isprsjprs.2014.02.013.

36. Communications Network ICs > Wireless LAN ICs > Realtek RTL8188EUS...RTL8192CU / Realtek Semiconductor Corp. URL: <http://www.realtek.com.tw/products/productsView.aspx?Conn=4&Langid=1&Level=5&PFid=48&ProdID=277>.

37. Carrick-a-Rede Rope Bridge. URL: <https://www.pintower.com/media/104356916340851366>; 23 Insane Hanging Bridges. URL: <https://www.buzzfeed.com/mjkiebus/21-insane-hanging-bridges-6ygq>.

38. .Computer technologies in information security : monograph / V. Zadiraka, Ya. Nykolaichuk (eds). Ternopil : Kart-blansh, 2015. P. 387.

39. Container Stowage Planning and how it works. URL: <http://panbras.com.br/CONTAINER%20STOWAGE%20PLANNING.pdf>.

40. CooCox CoIDE. URL: <http://www.coocox.org/software/coide.php>.

41. Cortes J, Martinez S, Karatas T, Bullo F. Coverage control for mobile sensing networks. *IEEE Trans Robot Autom*. 2004. No. 20 (2). P. 243–255.

42. Cortex-A9. Revision r4p1 : technical reference manual. 2012. URL: http://infocenter.arm.com/help/topic/com.arm.doc.ddi0388i/DDI0388I_cortex_a9_r4p1_trm.pdf.

43. CPU Stability Test. *BenchmarkHQ. Test utilities [BenchmarkHQ. Testovye utility]*. URL: <http://www.benchmarkhq.ru/russian.html?/b.html>.
44. Craig R. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *Computer graphics and interactive techniques (Association for Computing Machinery) SIGGRAPH'87: Proceedings of the 14th Annual Conf.*. 1987. P. 25–34. DOI:10.1145/37401.37406.
45. Crowther B. Flocking of autonomous unmanned air vehicles. *The aeronautical journal*. February 2003. Vol. 107, Is. 1068. P. 99–109. DOI: 10.1017/S0001924000018388.
46. CUAV hack link 2.4G digital link HDMI PPM & Mavlink for Pixhawk. Publ. Mar. 01, 2017. URL: <https://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?2843604-CUAV-HACK-LINK-2-4G-Digital-Link-HDMI-PPM-Mavlink-for-PIXHAWK>.
47. Cui Z., Lu N., Jing X., Shi X. Fast Dynamic Convolutional Neural Networks for Visual Tracking. *Machine Learning Research (PMLR)* : Proceedings of the 10th Asian Conference. 2018. Vol. 95. P. 770–785. URL: <http://proceedings.mlr.press/v95/cui18a/cui18a.pdf>.
48. D'Andrea R. Guest editorial can drones deliver? *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2014, July. Vol. 11, Is. 3, P. 647–648. DOI: 10.1109/TASE.2014.2326952.
49. Darintsev O. V., Migranov A. B., Yudincev B. S. Neural network algorithm of planning trajectories for a group of mobile robots. *Artificial Intelligence / Ufa State Aviation Technical University*. 2011. No. 1. P. 154–160.
50. De 6 pitch finalisten van Web Summit 2015. *Technologium* : website. Publ. Nov. 5, 2015. URL: <http://www.technologium.be/web-summit-2015-de-pitch-finalisten>.
51. Design of an autonomous ground vehicle by the University of West Florida Unmanned Systems Lab. for the 2014 Intelligent Ground Vehicle Competition

(IGVC) : Project EEL4930 / M. Fortenberry, D. Calvert, K. Van Lingham, X. Geng. URL: <http://www.igvc.org/design/2014/29.pdf>.

52. Development of multi-threaded applications using optimization method for platforms. *Intel software developer zone: documentation*. Publ. February 3, 2011., URL: <https://software.intel.com/ru-ru/articles/61695>.

53. Distributed Autonomous Robotic Systems 7 / M. Gini, R. Voyles (eds). Springer Science & Business Media, 2007. 248 p.

54. DJI Phantom 4 WM330A – Drone : Product teardown report. Publ. June 20, 2016. URL: <https://techinsights.com/reports-and-subscriptions/open-market-reports/Report-Profile/?ReportKey=11239>.

55. Drone Formation Flight: web-site of EHang intelligent autonomous aerial vehicle company. URL: <http://www.ehang.com/formation/feature/>.

56. Drones in agriculture. *Digital Transformation Monitor* / European Commission. 2018, Jan. 6 p. URL: <https://agropro.club/articles/bezpilotniki-suchasnijinstrument-dlya-agrariya/>.

57. Durišić M., Tafa Z. Z., Dimić G., et al. A Survey of military applications of wireless sensor networks : presentation. *Embedded computing (MECO-2012)* : Proceedings of mediterranean Conf., Bar, Montenegro, Serbia, 19–21 June, 2012. P. 196–199. URL: http://home.etf.rs/~vm/ppt/1%20A_Survey_Military_Apps_WSNs_MPDj.ZT.GD.VM.pdf.

58. Espressif ESP8266, Qualcomm Atheros AR9331 : Datasheet Search. URL: http://www.datasheet4u.com/share_search.php?sWord=ESP8266.

59. FATMAP: Hi-Res 3D Ski Mapping App Launches in the Alps / A. Traynor. Publ. Feb. 10, 2017. URL: <https://snowbrains.com/fatmap-hi-res-3d-ski-mapping-app-launches-alps/>.

60. Flight Control Systems: User's Guide. URL: <http://docs.sky-drones.com/SmartAP-User-Guide.pdf>.

61. Frank Announces Drones with Enhanced Capabilities to Address Industrial Use. Publ. : Sept. 8, 2016. URL: <https://dronelife.com/2016/09/08/interdrone-update-prodrone-announces-drones-with-enhanced-capabilities-to-address-industrial-use/>.

62. Friese L., Jenzen-Jones N.R., Smallwood M. The Chinese QLZ87 automatic grenade launcher emerging unmanned threats: The use of commercially-available UAVs by armed non-state actors (Special report) / Australia by Armament Research Services (ARES). 2016, Feb. 2016. No. 2. 66 p.

63. Friman O., Follo P., Ahlberg J., Sjokvist S. Methods for Large-Scale Monitoring of District Heating Systems Using Airborne Thermography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Aug. 2014. Vol. 52, Is. 8. P. 5175–5182. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2287238.

64. Geier E. 7 Tips to Increase Wi-Fi Performance. *Wi-Fi planet homepage*. Publ. 2012, March 8. URL: <http://www.wi-fiplanet.com/tutorials/7-tips-to-increase-wi-fiperformance.html>.

65. Geier E. How to extend your Wi-Fi network. *PC World*. Publ. Aug. 28, 2012. URL: http://www.pcworld.com/article/261495/how_to_extend_your_wi-fi_network.html.

66. GeoFlyer Europa 3D – Mappa Offline GPS Percorsi. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.geomind.europe&hl=it>.

67. Gibbs M. Linux in the Air: Drone systems go open-source. Ten drone systems that use Linux : Presentation. *Network World from IDG* : website. Publ. Apr. 21, 2015. URL: <https://www.networkworld.com/article/2912381/wireless/linux-in-the-air-drone-systems-go-open-source.html>.

68. Goldman J. Drones hit new heights at CES 2016. CNET, Gadgets, January 10, 2016. URL: <http://www.cnet.com/news/drones-ces-2016/>.

69. Google Maps Static API. Publ. June 7, 2018. URL: <https://developers.google.com/maps/documentation/maps-static/intro?hl=en>.

70. Google Maps Static. URL: <https://maps.googleapis.com/maps/api/staticmap?center=46.9682166,32.0129256&zoom=12&size=400x400>.

71. Grama A., Karypis G., Kumar V., et al. Introduction to parallel computing. 2nd ed. Addison-Wesley, 2003. 656 p. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.726.694&rep=rep1&type=>.
72. Green zones: Drone.UA together with ecologists are exploring Kiev. Publ. Oct. 29, 2016. URL: <http://drone.ua/green-zones-drone-ua-together-with-ecologists-are-exploring-kiev/>.
73. Grossman P. Discrete mathematics for computing. 2nd ed. N. Y. : Palgrave Macmillan, 2002. 316 p.
74. Guang Y., Vikram K. Optimal path planning for unmanned air vehicles with kinematic and tactical constraints. *Decision and control* : Proceedings of the 41th IEEE Conf., Las Vegas, Nevada, USA, 10–13 Dec., 2002. Vol. 2. P. 1301–1306.
75. Gummadi R., Wetherall D., Greenstein B., Seshan S. Understanding and mitigating the impact of RF interference on 802.11 networks (ACM SIGCOMM'07). New York, NY, USA : ACM, 2007. P. 385–396.
76. Hahanov V., Gharibi W., Abramova L. S., et al. Cyber physical system-smart cloud traffic control. *East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2014)* : Proceedings of IEEE Symposium, Kiev, Ukraine, 26–29 Sept., 2014. P. 1–18. DOI: 10.1109/EWDTS.2014.7027107.
77. Hallquist J. O. LS-DYNA theoretical manual / Livermore Software Technology Corporation. Livermore. SA. 2006. 498 p.
78. Hamann H. Space-Time Continuous Models of Swarm Robotic Systems Supporting Global-to-Local Programming [Austria, University of Graz]. Berlin; Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. Vol. 9, 147 p. doi: 10.1007/978-3-642-13377-0.
- Malham S. J. A., Wiese A. An introduction to SDE simulation : Review article. April 5, 2010. URL: <https://arxiv.org/pdf/1004.0646.pdf>.
79. Hamann H. Swarm Robotics: A Formal Approach. Springer, 2018. 210 p.
80. Häunggi P., Jung, P. Colored Noise in Dynamical Systems. *Advances in Chemical Physics*. 2007. P. 239–326. DOI:10.1002/9780470141489.ch4.
81. Haxhimusa Y., Carpenter E., Catrambone J., et al. 2D and 3D Traveling

Salesman Problem. *The Journal of Problem Solving*. 2011. Vol. 3, Iss. 2, Art. 8. P. 167–193. DOI: 10.7771/1932-6246.1096.

82. Hekmat R. Ad-hoc networks: Fundamental properties and network topologies. Zoetermeer, The Netherland : Springer, 2006. 154 p.

83. Hiromoto R. E., Sachenko A., Kochan V., et al. Mobile Ad Hoc wireless network for pre- and post-emergency situations in nuclear power plant. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems : Proceedings of IEEE 2nd Int. Symposium on Wireless Systems, Offenburg, Germany, 11–12 September, 2014*. P. 92–96. DOI: 10.1109/IDAACS-SWS.2014.6954630.

84. Hla K. H. S., Choi Y.S., Park J. S. The multi agent system solutions for wireless sensor network. *Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications*. Vol. 4953. Springer, Incheon, Korea, 2008. P. 454-463. (Series : Lecture Notes in Computer Science).

85. Hlukhov V., Lukenyuk A., Shenderuk S. Satellite scientific data collection and accumulation system as a basis for cyber-physical systems construction. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2016. Vol. 1, No. 2. P. 1–6.

86. Hopfield J. J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1982. Vol. 79. P. 2554–2558.

87. Hopfield J. J., Brody C. D. What is a Moment? Transient synchrony as a collective mechanism for spatiotemporal integration, *Proceedings of the NAS of the USA*. 2001. Vol. 98, No. 3. P. 1282–1287. DOI: 10.1073/pnas.98.3.1282

88. Howard A., Mataric M. J., Sukhatme G. S. An incremental self-deployment algorithm for mobile sensor networks. *Autonomous Robots, Special Issue on Intelligent Embedded Systems*. 2002. No. 13 (2). P. 113–126.

89. Intel plans to break drone light show record with over 1,500 drones flown at 50th Anniversary Celebrations. *Intel Newsroom* : site. Publ. April 30, 2018. URL: <https://newsroom.intel.com/news/intel-plans-break-drone-light-show-record-over-1500-drones-flown-50th-anniversary-celebrations/>.

90. Intel® Math Kernel Library – documentation. Publ. Sept. 1, 2017. URL: <https://software.intel.com/en-us/articles/intel-math-kernel-library-documentation>.
91. Iverson K. E. A Programming Language. John Wiley & Sons Inc., 1962. 286 p.
92. Jun S., Yatskiv V., Sachenko A., Yatskiv N. Data transmission optimal routing in WSN using ant colony algorithm. *Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012)* : Proceedings of IEEE Int. Conf., Lviv-Slavske, Ukraine, 21–24 Feb., 2012.
93. Junior L. S., Nedjah N. Efficient strategy for collective navigation control in swarm robotics. *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 80. P. 814–823. DOI: 10.1016/j.procs.2016.05.371.
94. Kalra N., Martinoli A. Comparative study of market-based and threshold-based task allocation. *Distributed autonomous robotic systems 7*. Japan : Springer, 2006. P. 91–101.
95. Karnon J. Modeling using discrete event simulation. *Medical decision making*. 2012. P. 705–706.
96. Kelley J. Learn Cocoa Touch for iOS. Detroit : Apress, 2012. 396 p.
97. Kennedy J. The particle swarm: social adaptation of knowledge. *Evolutionary Computation* : Proceedings of IEEE Int. Conf.. 1997. P. 303–308.
98. Kennedy J., Eberhart R. C., Shi Y. Swarm Intelligence, San Francisco : Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 512 p.
99. Kettenburg E. Oak by Digistump: Wi-Fi for all things! (Arduino Compatible) : Project. 2016. URL: <https://www.kickstarter.com/projects/digistump/oak-by-digistump-wi-fi-for-all-things-arduino-comp>.
100. Kharchenko V., Kondratyuk V., Ilnytska S., Kutsenko O., Larin V. Urgent problems of UAV navigation system development and practical implementation. *Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments (APUAVD'2013)* : Proceedings of IEEE 2nd Int. Conf., Kiev, Ukraine, 15–17 Oct., 2013. P. 157–160.

DOI: 10.1109/APUAVD.2013.6705313.

101. Kharchenko V., Sklyar V., Siora A. Dependability of safety-critical computer systems through component-based evolution. *Dependability of Computer Systems* : Proceedings of IEEE 4th Int. Conf., Brunow, Poland, 30 June–2 July, 2009.

DOI: 10.1109/DepCoS-RELCOMEX.2009.22.

102. Kingston D., Holt R., Beardy R., et al. Decentralized perimeter surveillance using a team of UAVs. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. and Exhibit*. San Francisco, California, 15–18 Aug., 2005. 7 p. DOI: 10.2514/6.2005-5831.

103. Kochan V., Sachenko A., Yatskiv V., Kocha O. Energy-efficient method for controlling the transmitters power of wireless sensor network. *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)* : Proceedings of IEEE 1st Ukraine Conf., Kiev, Ukraine, 29 May–2 June, 2017. P. 1117–1120. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100423.

104. Kochan V., Sachenko A., Yatskiv V., Kochan O. Energy-efficient method for controlling the transmitters power of wireless sensor network. *Electrical and Computer Engineering (UKRCON'2017)* : Proceedings of IEEE First Ukraine Conf.. Kiev, Ukraine, 29 May – 2 June, 2017. P. 1117–1120. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100423.

105. Kojic N., Reljin I., Reljin B. Route selection problem based on Hopfield neural network. *Radioengineering*. 2013, Dec. Vol. 22, No. 4. P. 1182–1193.

106. Krainyk Y., Perov V., Musiyenko M., Davydenko Y. Hardware-oriented turbo-product codes decoder architecture. *Intelligent data acquisition and advanced computing systems: technology and applications (IDAACS – 2017)* : Proceedings of the 2017 IEEE 9th Int. Conf., Bucharest, Romania, 21–23 Sept., 2017. Vol. 1. P. 151–154. DOI: 10.1109/IDAACS.2017.8095067.

107. Kubasov I. A., Serdyukov P. N., et al. Estimation of communications capacity and range when employing Wi-Fi equipment in real urban environment. *Special equipment*. 2013, Feb. URL: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=1018&lvl=04.01.01.03.&p=1>

108. Kulakovska I. V., Zhuravska I. M. Mathematical modeling container network via a connected graph. *11th Int. Algebraic Conf. in Ukraine dedicated to the 75th anniversary of V. V. Kirichenko : Abstracts*, Kyiv, Ukraine, 3–7 July, 2017 / Taras Shevchenko National University of Kyiv. P. 68. URL: <https://www.imath.kiev.ua/~algebra/iacu2017/abstracts>.

109. Laravel по-русски: Документация 5.x. Опубл. 30.06.2017. URL: <https://laravel.ru/docs/v5/>.

110. LARK FPV U842-1 Guide – UDIRC. URL: www.udirc.com/6920.

111. Lee E. A. Cyber-physical systems – are computing foundations adequate? *Cyber-physical systems: Research motivation, techniques and roadmap* : Position paper for NSF workshop, Austin, TX, USA, Oct. 16–17, 2006. URL: http://ptolemy.eecs.berkeley.edu/publications/Material/06/CPSPositionPaper/Lee_CP_S_PositionPaper.pdf.

112. Li C., Zhang S., Wu H. Flying robot localization method based on multi-sensor fusion. *Int. Journal of Advanced Robotic Systems*. 2014. No. 11.178. 7 p. DOI: 10.5772/58927. URL: <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.5772/58927>.

113. Li L., Alcherio M., Abu-Mostafa Ya. S. Learning and measuring specialization in collaborative swarm systems. *Adaptive Behavior*. 2004. No. 12 (3-4). P. 199–212.

114. Mahanti A., Carlsson N., Williamson C., Arlitt M. Ambient interference effects in Wi-Fi Networks. *IFIP Networking. Chennai [India]*. 2010. URL: <https://www.cs.usask.ca/grads/nic169/Material/networking10b.pdf>.

115. Mainstreaming unmanned undersea vehicles into future U.S. naval operations: Abbreviated version of a restricted report. Washington : The National Academies Press, 2016. DOI: 10.17226/21862.

116. MapKit. Framework : documentation. URL: https://developer.apple.com/documentation/mapkit?changes=_8.

117. MathWorks. Free MATLAB Trial. Academic License id 5782752. URL: <https://www.mathworks.com/campaigns/products/trials.html>.

118. Maurice P. Pixhawk le nouveau contrôleur de vol 32bits. Publ. Oct. 15, 2013. URL: <https://www.mondrone.net/pixhawk-nouveau-controleur-de-vol-32bits/>.

119. MAVLINK Common Message Set : Official MAVLink Documentation (#24). URL: <http://mavlink.org/messages/common>.

120. MAVLink library for the C programming language. URL: https://github.com/mavlink/c_library.

121. MAVLink Micro Air Vehicle Communication Protocol. URL: <http://qgroundcontrol.org/mavlink/start>.

122. Melnyk A. Cyber-physical systems multilayer platform and research framework. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2016. Vol. 1, No. 2. P. 77–85.

123. Melnyk A. Cyber-physical systems: the problems of creation and directions of development. *Proceedings of of the National University “Lviv Polytechnic” [Visnyk]*. 2014. No. 806. P. 154–161 (Computer systems and networks).

124. Mestas-Carrascosa F.-J., Torres-Sánchez J., Clavero-Rumbao I., et al. Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management. *Remote Sensing*. 2015. No. 7. P. 12793-12814. DOI: 10.3390/rs71012793.

125. Min H. K., Wang Z. D. Group escape behavior of multiple mobile robot system by mimicking fish schools. *Robotics and biomimetics : Proceedings of IEEE Int. Conf.*. 2010. P. 320–326.

126. Mizokami K. All the combat vehicles of the U.S. Military in one giant poster / K. Mizokami. *Popular Mechanics*. web-site. Publ. May 26, 2016. URL: <https://www.popularmechanics.com/military/weapons/a21049/all-the-combat-vehicles-of-the-us-military-in-one-giant-poster/>.

127. Modeling and Simulation-Based Systems Engineering Handbook / D. Gianni, A. D'Ambrogio, A. Tolk (eds). CRC Press, 2014. 513 p.

128. Moen J. Swarm robotics 2 (Lect. 13); UiOslo. Publ. 28.11.2018. URL: https://www.uio.no/studier/emner/matnat/its/TEK5010/h18/forelesningspresentasjoner/tek5010_mas_lecture_13_swarmrobotics2.pdf.

129. MongoDB от теории к практике. Руководство по установке кластера mongoDB. Опубл. 28.03.2014. URL: <https://habrahabr.ru/post/217393/>.

130. Mueller M. W. Increased autonomy for quadrocopter systems: trajectory generation, fail-safe strategies and state estimation : Doctoral Thesis ETH No. 23137. Zürich, 2016. DOI: 10.3929/ethz-a-010655275.

131. Mueller M. W., D'Andrea R. Critical subsystem failure mitigation in an indoor UAV testbed. *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012* : Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf., Vilamoura, Portugal, 7–12 Oct., 2012. P. 780–785. DOI: 10.1109/IROS.2012.6385910.

132. Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles / A. Ollero, I. Maza (eds). Springer, 2007. 238 p.

133. Multi-Robot Systems: From Swarms to Intelligent Automata : Proceedings from the 2002 NRL Workshop on Multi-Robot Systems / A. C. Schultz, L. E. Parker (eds). Springer Science & Business Media, 2013. 235 p.

134. Musiyenko M. P., Burlachenko I. S., Denysov O. O., Zhuravska I. M. Development of double median filter for optical navigation problems. *Data Stream Mining & Processing (DSMP–2016)* / Lviv Polytechnic National University : Proceedings of the IEEE 1st Int. Scientific and Technical Conf., Lviv (vil. Stare Selo), 23–27 Aug., 2016 . P. 177–181. DOI: 10.1109/DSMP.2016.7583535.

135. Musiyenko M. P., Zhuravska I. M., Burlachenko I. S., Denysov O. O. The principles of the cyber-physical components' organization based on the methods of the multi-agent interaction of the moving objects. *Advances in Cyber-Physical Systems* / Lviv Polytechnic National University. 2016. Vol. 1, No. 1. P. 48–57. URL: <http://science2016.lp.edu.ua/acps/acps-vol-1-no-1-2016/1-1>.

136. Musiyenko M. P., Zhuravska I. M., Kulakovska I. V., Kulakovska A. V. Simulation the behavior of robot sub-swarm in spatial corridors. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO – 2016)* : Proceedings of IEEE 36th Int. Conf., Kyiv, Ukraine, 19–21 Apr., 2016. P. 382–387. DOI: 10.1109/ELNANO.2016.7493090. Scopus EID: 2-s2.0-84979517480.

137. Navy's revolutionary Sea Hunter drone ship being tested out of Pearl Harbor / Olson W. Publ. Nov. 8, 2018. URL: <https://www.stripes.com/news/navy-s-revolutionary-sea-hunter-drone-ship-being-tested-out-of-pearl-harbor-1.555670#gallery>.

138. Nikiforov V. V. Feasibility of real-time applications on multicore processors. *SPIIRAS Proceedings*. 2009. No. 8. P. 255–284.

139. North Dakota UAS Test Site Continues Research Collaboration with NASA / North Dakota Department of Commerce. Publ. Apr. 24, 2018. URL: <https://www.commerce.nd.gov/news/NorthDakotaUASTestSiteContinuesResearchCollaborationwithNASA/>.

140. NP UAS TS Infrastructure. *Northern Plains Unmanned Aircraft Systems Test Site: Research*. URL: <http://www.npuasts.com/research.html>.

141. Parrot Apps: Android, iOS, Windows. *Parrot SA* : web-site. URL: <http://global.parrot.com/usa/apps/>.

142. Parrot Bebop + Skycontroller – quadcopter with navigation and camera. *Medgadgets: First blog-shop smart electronics*. Publ. Oct., 2015. URL: <http://medgadgets.ru/shop/parrot-bebop-skycontroller.html>.

143. Parrot Mambo Grabber. URL: <https://www.parrot.com/us/spareparts/drones/parrot-mambo-grabber> (Last accessed: June 11, 2018).

144. Payton D, Estkowski R, Howard M. Pheromone robotics and the logic of virtual pheromones. *Swarm robotics* : Lecture notes in computer science. 2005. Vol. 3342. P. 45–57.

145. Perdix fact sheet: Release of the strategic capabilities office DoD. URL: <https://www.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/Perdix%20Fact%20Sheet.pdf>.

146. Peterson A. Understanding the Histogram. Publ. Sep. 10, 2008. URL: <http://community.photostockplus.com/2010/09/08/understanding-the-histogram/>.

147. Phantom 4 Pro : specifications. 2017. URL: <http://www.dji.com/ru/phantom-4-pro/info>.

148. Pix4Dcapture turns your consumer drone into a professional mapping tool. URL: <https://pix4d.com/product/pix4dcapture/>.

149. Prevot T., Kopardekar P., Rios J. et al. UAS traffic management (UTM) concept of operations to safely enable low altitude flight operations. *Aviation Technology Integration and Operations* : Paper of 16th AIAA Conf., Washington Hilton, Washington D.C., USA, 13–17 June, 2016. DOI: 10.2514/6.2016-3292.

150. Products. Catalog. Processors. *Qualcomm Technologies Inc.* 2016. URL: <https://developer.qualcomm.com/hardware/which-processor>.

151. Property Process.ProcessorAffinity. Publ. Oct., 2016. URL: [https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/system.diagnostics.process.processoraffinity\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/system.diagnostics.process.processoraffinity(v=vs.110).aspx).

152. Proposal to create common rules for operating drones in Europe / European Aviation Safety Agency (EASA). 2015, Sept.. URL: https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/205933-01-EASA_Summary%20of%20the%20ANPA.pdf.

153. PX4 autopilot. URL: <https://pixhawk.org/>.

154. Rahman T., Hariadi M., Sumpeno S. NCP striking pattern in combat situation using boids behaviour. *Intelligent technology and its application (ISITIA)* : Proceedings of IEEE Int. seminar, Surabaya, Indonesia, 22–24 May, 2014. URL: <http://isitia.its.ac.id/base/index.php/SITIA/2014/paper/viewFile/343/143>.

155. Ralink RT3290...RT5350 : Datasheet PDF. URL: <http://datasheet-pdf.com/PDF/>.

156. Rana A. S., Zalzal A. M. S. A neural networks based collision detection engine for multi-arm robotic systems. *Artificial neural networks* : Proceedings of the 5th Int. Conf.. 1997. P. 140–145.

157. Real-time cooperative behavior for tactical mobile robot teams skills. impact study for tactical mobile robot operational units : Report / Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, November 2000. 92 p. URL: <https://www.cc.gatech.edu/ai/robot-lab/tmr/skillsassessment.pdf>.

158. Reynolds C. Flocks, herds, and schools: a distributed behavioural model. *Computer Graphics*. July, 1987. No. 21 (4). P. 25–34.
159. Richter J. CLR via C#. Full coverage of multicore programming Microsoft .NET Framework 4.5. 4th ed. Redmond, Washington : Microsoft Press, 2012. 813 p. URL: http://www.johnchukwuma.com/training/clr_via_c_4th_edition.pdf.
160. Robinson G., Davies J. B. C. The Amadeus project: an overview. *Industrial Robot: an Int. Journal*. 1997. Vol. 24, Is. 4. P. 290–296. DOI: 10.1108/01439919710176381.
161. Rolls Royce reveals remote controlled 'roboships' will take to the sea by 2020: Single operator can oversee ships from a holographic control room / Prigg M. Publ. June 24, 2016. URL: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3659201/Rolls-Royce-reveals-remote-controlled-roboship-augmented-reality-central-control-deck-hundreds-miles-away-sea-2020.html#>.
162. Rosen K. Discrete mathematics and its applications. 6th ed. McGraw-Hill Education, 2006. 1006 p.
163. Rousch E. T., Campbell R. H. Fast Dynamic Process Migration. *Distributed Computing Systems (ICDCS'1996)* : Proceedings of 16th International Conference. Hong Kong, May 27–30, 1996. DOI:10.1109/ICDCS.1996.508015.
164. RQ-4 Global Hawk оснастят боевым лазером. *Военное обозрение*. Опубл. 28.08.2017. URL: <https://topwar.ru/123590-rq-4-global-hawk-osnastyat-boevym-lazerom.html>.
165. Rumiankov D., Zhuravska I., Solobuto L., Musiyenko M. Reduction of noise similar to solar interference in computer networks based on Power Line Communication. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2017)* : Proceedings of the 8th IEEE Int. Conf., Bucharest, Romania, 21–23 Sept., 2017. Vol. 1. P. 215–221. DOI: 10.1109/IDAACS.2017.8095079.
166. Sachenko A., Kulakov Yu., Kochan V., et al. Computer networks. Ternopil,

2012. 476 p.

167. Sachenko A., Yatskiv V., Krepych R. Modified method of noise-immune data transmission in wireless sensors networks. *Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing* : Proceedings of IEEE Int. Conf., Wuhan, Hubei, China, 25–26 Apr., 2009, Vol. 2. P. 847–850. DOI: 10.1109/NSWCTC.2009.391.

168. Savinov V. Development of energy efficient distributed computer systems with self-contained remote modules. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* : Proceedings of 2014 IEEE 35th Int. Conf., Kyiv, Ukraine, 15–18 Apr., 2014. P. 456–458. DOI: 10.1109/ELNANO.2014.6873427.

169. Schouwenaars T., How J., Feron E. Decentralized cooperative trajectory planning of multiple aircraft with hard safety guarantees. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. and Exhibit* : AIAA Meeting Material, Providence, Rhode Island, 16–19 Aug., 2004. No. 5141. 14 p. DOI: 10.2514/6.2004-5141.

170. Shared vs VPS vs Dedicated vs Cloud Hosting. Publ. Dec. 12, 2017. URL: <https://wp-rocket.me/blog/shared-vs-vps-vs-dedicated-vs-cloud-hosting/>.

171. Shi Z. G., Tu J., Zhang Q., et al. Survey of swarm robotics system. *Advances in Swarm Intelligence* : Lecture Notes in Computer Science. 2012. Vol. 7331. P. 564–572.

172. Singh S. P. N., Thayer S. M. ARMS: Autonomous robots for military systems / The Robotics Institute Carnegie Mellon University Pittsburgh, Pennsylvania, 2001. 72 p. URL: https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub3/singh_surya_2001_2/singh_surya_2001_2.pdf.

173. Sjögren L. Stochastic Processes lecture notes ch. 6: Brownian Motion: Langevin Equation [University of Gothenburg]. URL: <http://physics.gu.se/~frtbm/joomla/media/mydocs/LennartSjogren/kap6.pdf>.

174. Slusar V. Data transmission on board the UAV: NATO standards. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2010. No. 3. P. 80–86.

175. Solesvik M., Kondratenko Yu., Kondratenko G., et al. Fuzzy decision

support systems in marine practice. *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)* : Proceedings of IEEE Int. Conf., Naples, Italy, 9–12 July, 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/FUZZ-IEEE.2017.8015471.

176. Space-time continuous models of swarm robotic systems: Supporting global-to-local programming / Ed. H. Hamann. Springer Science & Business Media, 2010. 160 p. DOI: 10.1007/978-3-642-13377-0.

177. State and Local Regulation of Unmanned Aircraft Systems (UAS) Fact Sheet / Federal Aviation Administration Office of the Chief Counsel. Publ. Dec. 17, 2015. URL: https://www.faa.gov/uas/regulations_policies/media/UAS_Fact_Sheet_Final.pdf.

178. Stewart J. M., Chapple M., Gibson D. CISSP (ISC)2 Certified Information Systems Security Professional Official Study Guide. 7th ed. Indianapolis, Indiana : John Wiley & Sons. Inc., 2015. 1080 p.

179. STM32F429AG : Download Datasheet. URL: http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-high-performance-mcus/stm32f4-series/stm32f429-439/stm32f429ag.html.

180. Stockton G. R. Leak Detection – Aerial Thermal Mapping Reveals Leaks in All Types of Systems. *CampusEnergy2017 [International District Energy Association]*. Miami, FL., February 20–24, 2017. 81 p. URL: <https://www.districtenergy.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=5ae4b471-ee47-9f2f-4443-94a8fe505273> (accessed 06.03.2019).

181. Study: Drones in the FY 2019 Defense Budget / B. College. Publ. April 9, 2018. URL: <https://dronecenter.bard.edu/drones-in-the-fy19-defense-budget/>.

182. Study: Drones in the FY 2019 Defense Budget. Publ. April 9, 2018. URL: <https://dronecenter.bard.edu/?s=FY>.

183. Subbotin S. A. Building a fully defined neuro-fuzzy network with a regular partition of a feature space based on large sample. *Radio electronics, computer science, control*. 2016. No. 3. P. 47–53.

184. Sullivan B. The UK wants swarms of drones for defence missions. Publ. Sept. 6, 2016. URL: https://motherboard.vice.com/en_us/article/yp35kv/the-uk-wants-swarms-of-drones-for-defence-missions.

185. Sutantyo D. K., Kernbach S., Nepomnyashchikh V. A., Levi P. Multi-robot searching algorithm using Levy Flight and artificial potential field. *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR-2010)*: Proceedings of the 8th IEEE Int. Workshop, Bremen, Germany, 26–30 July, 2010. 6 p. URL: <https://arxiv.org/pdf/1108.5624.pdf>.

186. Talla V., Kellogg B., Ransford B., Naderiparizi S., et al. Powering the next billion devices with Wi-Fi. *Emerging Networking EXperiments and Technologies (CoNEXT'2015)*: Paper of the 11th Int. Conf., Heidelberg, Germany, 01–04 Dec., 2015. DOI: 10.1145/1235.

187. Tan Yi. Handbook of Research on Design, Control, and Modeling of Swarm Robotics. IGI Global, 2015. 854 p.

188. Tanenbaum A. S., Bos H. *Modern operating systems*. 4th ed. Amsterdam, The Netherlands : Pearson Prentice-Hall, 2015. 1072 p.

189. Task scheduler how to... *Microsoft TechNet*. 2017. URL: [https://technet.microsoft.com/en-gb/library/cc766428\(v=ws.11\).aspx](https://technet.microsoft.com/en-gb/library/cc766428(v=ws.11).aspx).

190. Teh S., Mejias L., Corke P., et al. Experiments in Integrating Autonomous Uninhabited Aerial Vehicles (UAVs) and Wireless Sensor Networks. *Robotics and Automation* : Proceedings of the Australasian Conf., Canberra, Australia, 3–5 Dec., 2008. URL: <http://www.araa.asn.au/acra/acra2008/Material/pap118s1.pdf>.

191. Tencent and Zerotech unveil commercial drone based on Qualcomm Snapdragon flight platform (Press release). *Qualcomm Technologies, Inc. and/or its affiliated companies* : website. Publ. May 6, 2016. URL: <https://www.qualcomm.com/news/releases/2016/01/05/tencent-and-zerotech-unveil-commercial-drone-based-qualcomm-snapdragon>.

192. The U. S. military wants to distribute Wi-Fi with drones. Publ. Apr. 18, 2014. URL: <http://m.kaskus.co.id/thread/5350c9f2f9ca174c398b473c/the-us-military->

wants-to-distribute-wi-fi-with--drones/?ref=postlist-54&med=recommended_or_you.

193. The U.S. Postal Service will conduct a two-week test using big rigs supplied by autonomous trucking firm TuSimple / Andsoft software gestión transporte TMS. Publ. May 24, 2019. URL: <https://transporttmsandlogisticstms.com/2019/05/24/the-u-s-postal-service-will-conduct-a-two-week-test-using-big-rigs-supplied-by-autonomous-trucking-firm-tusimple/>.

194. The WiFi-amplifier to AR.Drone 2 and other small items. *The art of system administration*. Publ. Apr. 12, 2015. URL: <http://macroadmin.ru/2015/04/wifi-ar-drone-2>.

195. Thermal Mapping – Inspection Of District Heating. In: Case Study for Drone Systems – with Thermal Capture Recorder 2.0 640. Copenhagen, Denmark. 4 p. URL: <https://thermalcapture.com/thermal-mapping-inspection-of-district-heating/> (accessed 06.03.2019).

196. To diagnose WiFi problems in complex networks. *MetaGeek.Com*. URL: <http://www.inssider.com/>.

197. Trasviña-Moreno C. A., Blasco R., Marco Á., et al. Unmanned aerial vehicle based wireless sensor network for marine-coastal environment monitoring, *Sensors [Basel, Switzerland]*, 2017, Mar. No. 17 (3). Vol. 460. 22 p. DOI: 10.3390/s17030460.

198. Trends in Intelligent Robotics, Automation, and Manufacturing / S. G. Poonambalam et al. (eds). Springer, 2012. 528 p.

199. Trianni V., Groß R., Labella T. H. et al. Evolving aggregation behaviors in a swarm of robots. *Advances in artificial life. Lecture notes in computer science*. 2003. Vol. 2801. P. 865–874.

200. Troubleshooting task scheduler. *Microsoft TechNet*. 2017. URL: [https://technet.microsoft.com/en-gb/library/cc721846\(v=ws.11\).aspx](https://technet.microsoft.com/en-gb/library/cc721846(v=ws.11).aspx).

201. Tsourdos A., White B., Shanmugavel M. Cooperative path planning of unmanned aerial vehicles. Wiley, 2011. 190 p.

202. USBasp driver for Windows 7 and Windows Vista X64 : Announcements. Publ. May 24, 2011. URL: www.protostack.com/blog/2011/05/usbasp-driver-for-windows-7-and-windows-vista-x64.

203. VECTOR Technical Specification. URL: <https://www.uavnavigation.com/support/kb/autopilots/vector/vector-technical-specification>.

204. Vincent O. R., Folorunso O. A. Descriptive algorithm for Sobel image edge detection. *Proceedings of Informing Science & IT Education Conf. (InSITE'2009)*, Macon, United States, 12–15 June, 2009. P. 97–107. DOI: 10.1.1.330.3734.

205. Wang N., Wang L., Go X., et al. Hopfield neural network guided evolutionary algorithm for aircraft penetration path planning. *Advances in neural network research and applications : Lecture notes in electrical engineering*. Vol. 67. Berlin; Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. P. 235–243. DOI: 10.1007/978-3-642-12990-2_27.

206. Wang X., Yadav V., Balakrishnan S. N. Cooperative UAV formation flying with obstacle/collision avoidance. *IEEE transactions on control systems technology*. 2007. Vol. 15, Is. 4. P. 672–679. DOI: 10.1109/TCST.2007.899191.

207. Watanabe T., Johnson E. N. Automatic landing on a moving platform using deep neural network estimation. *VTOL Unmanned Aircraft Systems and Autonomy / American Helicopter Society Int. : Proceedings of the 7th AHS Technical Meeting*, Mesa, United States, 24–26 Jan., 2017. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85032922077&origin=inward&txGid=12fd37a855e5ff746a8ba3a228a30890>.

208. Werners B., Kondratenko Y. P. Alternative fuzzy approaches for efficiently solving the capacitated vehicle routing problem in conditions of uncertain demands. *Complex Systems: Solutions and Challenges in Economics, Management and Engineering Part of the Part of the Studies in Systems, Decision and Control (SSDC) : book series*. Vol. 125. Springer, Oct. 31, 2017. P. 521–543.

209. Werners B., Kondratenko Y. P. Tanker routing problem with fuzzy demands of served ships. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2009. № 1. P. 47–64.

210. What Is Container Stowage Planning? Publ. Jan. 21, 2017. URL: <https://posey-intl.com/what-is-container-stowage-planning/>.

211. Wi-Fi – wireless standard. *TADviser Portal (Technologies + Adviser)*. Publ. Mar. 13, 2018. URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Wi-Fi_\(Wireless_Fidelity\)_-_стандарт_беспроводной_связи_802.11](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Wi-Fi_(Wireless_Fidelity)_-_стандарт_беспроводной_связи_802.11).

212. Wulfsohn D., Lagos I. Z. The use of a multicopter and high-resolution imaging for precision horticulture in Chile: an industry perspective. *Precision Agriculture* : Proceedings of the 12th Int. Conf., Sacramento, California, USA, July, 2014. Vol. 1688. 15 p.

213. Yan M. Dijkstra's algorithm : Presentation / Massachusetts institute of technology, department of mathematics. 2016. URL: <http://math.mit.edu/~rothvoss/18.304.3PM/Presentations/1-Melissa.pdf>.

214. Yatskiv V., Yatskiv N., Sachenko A., et al. Concept of designing the wireless sensor networks based on ant intelligence. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2015)* : Proceedings of IEEE 8th Int. Conf., Warsaw, Poland, 24–26 Sept., 2015. Vol. 2. P. 863–866. DOI: 10.1109/IDAACS.2015.7341426.

215. Yu P., Tate S. R. Online/Offline signature schemes for devices with limited computing capabilities. *The Cryptographers' Track at the RSA Conf.'2008* : Proceedings of the Conf., San Francisco, CA, USA, 8-11 Apr., 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-79263-5_19.

216. Zhang W., Mueller M. W., D'Andrea R. A controllable flying vehicle with a single moving part. *Robotics and Automation (ICRA'2016)* : Proceedings of, IEEE Int. Conf., Stockholm, Sweden, 16–21 May, 2016. P. 3275–3281. DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487499.

217. Zhang Yi. Z, Antonsson E. K, Martinoli A. Evolving neural controllers for

collective robotic inspection. *Applied soft computing technologies, the challenge of complexity, advances in soft computing*. 2006. Vol. 34. P. 717–729.

218. Zhong C., Luo C., Chu Z., et al. A continuous Hopfield neural network based on dynamic step for the traveling salesman problem. *Neural Networks (IJCNN'2017)* : Proceedings of IEEE Int. Joint Conf., Anchorage, AK, USA, 14–19 May, 2017. P. 3318–3323. DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7966272.

219. Zhuravska I., Lernatovych D., Burenko O. Detection the places of the heat energy leak on the underground thermal pipelines using the computer system. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2019. Vol. 4, No. 3, P. 01–09. DOI: 10.25046/aj040301. **Scopus**.

220. 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. *Proceedings of SPIE – Int. Society for Optics and Photonics [Poland]*. 2017. Vol. 10445 : Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. No. 1044527. P. 1–13. DOI: 10.1117/12.2280965.

221. Zhuravska I. M., Lavrynenko S. V. Implementation the monitoring CPU loading application for mobile devices. *Information technology and interactions (IT&T-2017)* / Taras Shevchenko National University of Kyiv : Proceedings of the 4th Int. Scientific Conf.. Kyiv, Ukraine, 8-10 Nov., 2017. P. 112–113.

222. Zhuravska I. M., Lernatovych D. O. Fuzzy modeling system of human behavior and biometric identification using cloud services. *Applied Sciences in Europe: Tendencies of Contemporary Development* : Materials of the 5th Int. Scientific Conf., Stuttgart, Germany, 24 March, 2014. P. 30-32.

223. Zhuravska I. M., Popel M. I. Automation of pharmaceutical warehouse using groups robots with remote climate control and video surveillance. *Science and Innovation in the XXI century* : Collection of Conf. Materials of Int. Scientific-Practical

Conf., London, the United Kingdom, 11–12 Dec., 2014. P. 30–32. DOI: 10.5281/zenodo.14090.

224. Zhuravska I., Borovlova S., Kostyria M., Koretska O. Efficiency improvement of using unmanned aerial vehicles by distribution of tasks between the cores of the computing processor. *Technology audit and production reserves*. 2017. Vol. 6, No. 6 (38). P. 4–13. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.117889.

225. Zhuravska I., Kulakovska I., Musiyenko M. Development of a method for determining the area of operation of unmanned vehicles formation by using the graph theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2, No. 3 (92). P. 4–12. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.128745.

226. Zhuravska I., Musiyenko M. Heterogeneous computer networks of critical application: Creation and functioning of networks based on UAVs' swarms and flocks : monograph. LAMBERT Academic Publishing, 2018. 367 p.

227. Абрамов В. О., Клименко С. Ю. Базові технології комп'ютерних мереж : навч. посіб. 2-ге вид. Київ : А.С.К., 2013. 248 с.

228. Автоматизированные информационные системы для удалённого отслеживания / Starcom Systems Ltd. – GPS Tracking Systems URL: <https://www.starcomsystems.com/ru/products>.

229. Альбов А. Квантовая криптография. СПб. : ООО «Страта», 2015. 248 с.

230. Антощук С. Г., Годовиченко Н. А. Модели представления событий при анализе видеопотока. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2013. № 11 (87). С. 142–149.

231. Антощук С. Г., Крылов В. Н., Максимов М. В. Помехоустойчивая сегментация бинаризованных изображений символов. *Труды Одес. политехн. ун-та*. 1998. № 2. 3 с. URL: [http://storage.library.opu.ua/online/periodic/opu_1998_2\(6\)/2_14.pdf](http://storage.library.opu.ua/online/periodic/opu_1998_2(6)/2_14.pdf).

232. Антощук С. Г., Сербина Н. А. Система распознавания текстурных изображений при экологическом мониторинге. *Искусственный интеллект*. 2002.

№ 4. С. 406–413. URL: http://www.iai.dn.ua/public/JournalAI_2002_4/Razdel4/01_AntoshchukSerbina.pdf.

233. Белецкий А. Я., Максименко А. В., Навроцкий Д. А. и др. Программно-моделирующий комплекс ВРС алгоритма поточного шифрования и помехоустойчивого кодирования видеосигналов, передаваемых с борта БПЛА. *Захист інформації*. 2014. Т. 16, № 3. С. 184–191. DOI: 10.18372/2410-7840.16.7534.

234. Беспилотные решения для работы с площадными и протяженными объектами. *Drone.UA* : веб-сайт. URL: http://drone.ua/?gclid=CjwKEAjw7O6vBRDpi7O-8OWSkwESJACNFsgxZXOf5G1-hpr3StSFdlCtnxjOzPKAjCfcugf0RY4DXhoC607w_wcB.

235. Беляев О. В., Карташов В. М. Моделі сигналів в універсальному мультимедійному стрілецькому тренажері. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»* : зб. наук. праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. № 44 (1266). С. 28–34. URL: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2017_44.pdf.

236. Биард Р. У., МакЛэйн Т. У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. М. : Техносфера, 2015. 312 с.

237. Боровльова С. Ю., Журавська І. М., Костиря М. А. Бенчмаркінг ефективності організації ітераційних процесів у багатоядерному процесорі. *Могілянські читання-2017.* / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13–17 листоп. 2017 р. С. 57–60 (Секція : АСУ, CASE-засоби та програмна інженерія).

238. БПЛА RQ-4 Global Hawk. *Боевая техника* : форум. Опубл. 09.09.2017. URL: <http://spec-naz.org/index.php?/topic/6373/>.

239. Бражников Р. Уровни API, версии Android, –target, файл AndroidManifest.xml/. Опубл. 20.03.2015. URL: <http://romanbrazhnikov.ru/blog/2015/03/20/уровни-аpi-версии-android-target-файландroidmanifest-xml/>.

240. Бурлаченко І. С., Денисов О. О., Журавська І. М. Вибір апаратної платформи для проектування та реконфігурації рухомих об'єктів моніторингових мереж. *Могилянські читання – 2015* / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. XVIII Всеукр. наук.-метод. конф. Миколаїв, 12-20 листоп. 2015 р. Т. 1. С. 113–115.

241. Бурнашев В. В., Збруцький О. В., Управление автоматическим приземлением беспилотного самолета. Киев : Політехніка, 2015. 125 с.

242. Васюхін М. І., Ткаченко О. М., Касім А. М., Долинний В. В., Іванік Ю. Ю. Технологія отримання картографічних даних для геоінформаційної системи прецизійного землеробства. *Проблеми інформаційних технологій*. 2014. № 15. С. 64–69.

243. Взлом беспилотника займет у комплекса РЭБ «Шиповник-АЭРО» секунду. *Интерфакс. Новости ВПК*. Опубл. 14.09.2016. URL: http://vpk.name/news/163641_vzлом_bespilotnika_zaimet_u_kompleksa_reb_shipovnikaero_sekundu.html.

244. Вырелкин А. Д., Кучерявый А. Е., Прокофьев А. В. Исследование возможности применения беспилотного летательного аппарата в качестве временного головного узла кластеров наземной сенсорной сети. *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2015. № 1 (9). С. 27–34.

245. Гожий О. П. Інформаційні технології динамічного планування та прийняття рішень на основі ймовірісно-статистичних методів : автореф. дис.... д-ра техн. наук : 05.13.06 – інформаційні технології / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2016. 40 с.

246. Головинський А. Л., Маленко А. Л., Сергієнко І. В., Тульчинський В. Г. Енергоефективний суперкомп'ютер СКІТ-4. *Вісник Національної академії наук України*. 2013. № 2. С. 50–59. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/43042>.

247. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. 3-е изд. М : Техносфера, 2012. 1082 с.

248. Громовые дроны научат сбиваться в стаи / А. Борисов. URL : https://life.ru/t/%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B0/1035835/ghromov_yie_dronu_nauchat_sbivatsia_v_stai.

249. Давыдов В. О., Максимов М. В. Сравнительный анализ моделей нейронных сетей для решения задач классификации образов. *Труды Одес. политехн. ун-та.* 2002. № 1 (17). С. 1–3. URL: [http://storage.library.opu.ua/online/periodic/opu_2002_2\(18\)/4/4-5.pdf](http://storage.library.opu.ua/online/periodic/opu_2002_2(18)/4/4-5.pdf).

250. Довгенко О. Є., Журавська І. М. Моделі та методи розробки інформаційно-вимірювальних систем моніторингу температурного режиму побутових споруд. *Могилянські читання-2017 / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13–17 листоп. 2017 р. С. 31–32 (Секція «Комп'ютерна інженерія»).*

251. Дрон «Катран»: что о нём известно. Оpubл. 11.05.2018. URL: <http://rusnext.ru/news/1526016168>.

252. Дубков А.А. Конструктивная роль шума в нелинейных неравновесных системах. Нижний Новгород, 2014. 37 с.

253. Єлезаров В. О., Журавська І. М. Технологія Інтернету речей для забезпечення почергового підключення побутової техніки до електромережі. *Могилянські читання-2017 / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13–17 листоп. 2017 р. С. 32–34 (Секція : Комп'ютерна інженерія).*

254. Жарук Д. О., Журавська І. М., Мусієнко М. П. Програмне забезпечення на базі хмарного сервісу Google Firebase для керування безпілотними апаратами. *Інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами / Луцьк. нац. техн. ун-т. : зб. тез Міжнар. наук.-практ. конф., Луцьк, 28-29 квіт. 2017 р. Луцьк : Вежа-Друк, 2017. С. 16.*

255. Жерегі О. М. Дослідження та розробка програмного забезпечення абонентів рухомих моніторингових мереж на мобільній платформі Windows

Phone. *Інтелектуальні інформаційні системи – 2016* : тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф., Миколаїв, 16–17 лют. 2016 р. Миколаїв : Вид-во Чорном. держ. ун-ту ім. Петра Могили, 2016. Т. 1. С. 150–152.

256. Жуков І. А., Печурин Н. К., Кондратова Л. П. та ін. Розподіл ресурсів в обчислювальному кластері для БПЛА. *Проблеми інформатизації та управління*. 2016. Т. 3, Вип. 55. С. 34–38.

257. Жуков І. А., Дрововозов В. І., Масловський Б. Г. Експлуатація комп'ютерних систем та мереж : навч. посіб. Київ : НАУ, 2007. 368 с.

258. Журавская И. Н. Система восстановления пароля доступа к сторонней WiFi-сети в чрезвычайных ситуациях. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист (НСБЗ'2016)* / Держ. служба України з надзв. ситуацій, Черкас. ін-т пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля Нац. ун-ту цивільн. захисту України та [ін.] : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф., Черкаси, 21-22 жовт. 2016 р. С. 138–140.

259. Журавская И. Н. Современное состояние резонансных высоковольтных высокочастотных источников питания. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий* : сб. науч. тр. / Отв. ред. В. В. Шамко. Киев : Наук. думка, 1995. Вып. 2. С. 110–113.

260. Журавская И. Н., Божаткин С. М. Защита компьютерной сети применительно к облачным средам. *Сучасні проблеми інформаційної безпеки на транспорті* / Нац. ун-т кораблебудування : тези доп. III Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю, Миколаїв, 3–6 верес. 2013 р. С. 61–64. URL: <http://Conf.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail;jsessionid=00e8013f98b0bcb01232beacdce6?lectureId=23848&Conf.Id=19978&isProjectorView=false>.

261. Журавская И. Н., Назарова Н. С. Определение эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции двухобмоточного трансформатора. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий* : сб. науч. тр. /

Отв. ред. В. С. Крутиков ; ИИПТ НАН Украины. Николаев : Атолл, 2002. Вып. 4. С. 115–122.

262. Журавская И. Н., Щебетюк В. О. Создание стежоконтейнеров в телекоммуникации с БПЛА на основе Open Source протокола MAVLink. *Free and Open Source Software (FOSS-2015)* / Харк. нац. ун-т будівництва та архітектури : тези доп. VII Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 24-27 листоп. 2015 р. С. 36. URL: http://ekit.org.ua/sites/default/files/file_attach/FOSS/FOSS2015/FOSS-2015_Sbornik_tez.pdf.

263. Журавська І. М. IoT-мережа на базі Bluetooth-модулів для автоматизованого керування споживанням енергоресурсів. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво* / Луцьк. нац. техн. ун-т. 2018. Вип. 30–31. С. 37–44. URL: <http://ki.lutsk-ntu.com.ua/node/138/section/11>.

264. Журавська І. М. Аналіз та вибір WiFi-мережі в умовах нестабільної ефірної ситуації. *Технологічний аудит та резерви виробництва* : наук. журн. Харків : Технологічний центр, 2013. Т. 5. № 5 (13). С. 8–10. DOI: 10.15587/2312-8372.2013.18371.

265. Журавська І. М. Бездротовий метод керування відключенням пристроїв на борту БПЛА з обмеженими енергоресурсами. *Електротехнічні та комп'ютерні системи* / Одес. нац. політехн. ун-т. 2018. № 27(103). С. 205–212. DOI: 10.15276/eltecs.27.103.2018.23.

266. Журавська І. М. Використання трансферних вузлів рухомих мереж для атаки на комп'ютерні системи наземних абонентів мережі. *Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації* / Вінниц. нац. техн. ун-т : тези доп. VI Міжнар. наук.-практ. конф., Вінниця, 24–25 жовт. 2017 р. С. 58-60.

267. Журавська І. М. Гетерогенні комп'ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БПЛА : монографія. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2019. 192 с.

268. Журавська І. М. Забезпечення стабільного бездротового зв'язку у кіберфізичній системі з рухомими об'єктами. *Технологічний аудит та резерви*

виробництва : наук. журн. Харків : Технологічний центр, 2016. Т. 5, № 2 (31). С. 58–64. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.80784.

269. Журавська І. М. Забезпечення функціонування суб-роїв безпілотних літальних апаратів за допомогою бортових датчиків. *Датчики, прилади та системи (ДПС – 2017)* / Черкас. держ. технол. ун-т : тези доп. VI Міжнар. наук.-техн. конф., Херсон–Лазурне, 18–22 верес. 2017 р. Черкаси : Видавець Третяков О., 2017. С. 27–32.

270. Журавська І. М. Метод організації захищеного бездротового каналу з інтегрованим стежоконтейнером для моніторингової мережі відеокамер. *Інформаційна безпека та комп'ютерні технології (IS&CT 2017)* / Центральнуокр. нац. техн. ун-т : зб. тез доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., Кропивницький, 20–22 квіт. 2017 р. С. 46–47.

271. Журавська І. М. Проектування комп'ютерних мереж. Ч. I : Локальні мережі : навч.-метод. посіб. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. 124 с. (Методична серія ; вип. 171).

272. Журавська І. М. Проектування та монтаж локальних комп'ютерних мереж : навч. посіб. Миколаїв : Видавництво ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. 396 с.

273. Журавська І. М. Реєстрація великорозмірних вантажів за допомогою автоматизованої системи на базі пристроїв з обмеженими обчислювальними можливостями. *Електротехнічні та комп'ютерні системи* / Одес. нац. політехн. ун-т. 2017. № 26 (102). С. 60–67. DOI: 10.15276/eltecs.26.102.2017.7.

274. Журавська І. М., Барчинський М. В., Димедюк С. В., Програмна платформа мобільної системи керування рухомою моніторинговою мережею. *Інформаційні технології та взаємодії (IT&I – 2015)* / Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка та [ін.] : тези доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 3–5 листоп. 2015 р. С. 85–87.

275. Журавська І. М., Богаченко Є. В., Вдовиченко А. В. Організація відеотрансляції прес-конференції з локальної комп'ютерної мережі на центральний канал телебачення з використанням технології VLAN. *Могілянські*

читання – 2014 / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. XVII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 17–21 листоп. 2014 р. С. 57–58.

276. Журавська І. М., Божаткін С. М. Забезпечення мережевої безпеки хмарних середовищ. *Інформаційні управляючі системи та технології (ІУСТ-ОДЕСА-2013)* / Одес. нац. морський ун-т : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. / відп. ред. В. В. Вичужанін, Одеса, 8–10 жовт. 2013 р. С. 207–210 (Секція 4 : Засоби і методи захисту інформаційних систем).

277. Журавська І. М., Божаткін С. М., Мосєнзов Є. О. Програмне забезпечення підбору параметрів та розробка абонентського обладнання доступу до WiFi-мережі. *Комп'ютерні системи та мережеві технології (CSNT'2010)* / Нац. авіац. ун-т : тези доп. III Міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 15–17 черв. 2010 р. С. 18.

278. Журавська І. М., Залюбовський М. В., Мільошин А. С. Автоматизована система обліку великих вантажів з реєстраторами на базі мобільних пристроїв. *Могілянські читання-2017*. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13–17 листоп. 2017 р. С. 35–37 (Секція : Комп'ютерна інженерія).

279. Журавська І. М., Кулаковська І. В., Кулаковська А. В. Математичне моделювання мережі контейнеровозу за допомогою зв'язного графа. *Ольвійський форум-2017: Стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі* / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. XI Міжнар. наук.-практ. конф., Миколаїв – Коблево, 8–11 черв. 2017 р. С. 51-54.

280. Журавська І. М., Кулаковська І. В., Мусієнко М. П. Автоматизація обліку розвантаження суден-контейнеровозів. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2017)* / Херсон. держ. мор. академія : тези доп. IX Міжнар. наук.-практ. конф., Херсон, 23–25 трав. 2017 р. С. 203–206.

281. Журавська І. М., Лавриненко С. В., Обухова К. О. Моніторинг навантаження обчислювальних систем БПЛА. *Free and Open Source Software*

(FOSS-2017) : тези доп. IX Міжнар. наук.-практ. конф. / Харків. нац. ун-т будівництва та архітектури, Харків, 21–23 листопада 2017 р. Харків : Вид во ХНУБА, 2017. С. 72.

282. Журавська І. М., Мусієнко М. П., Румянков Д. І. Підвищення ефективності шифрування керуючого трафіку БПЛА засобами модифікованого блокового методу. *Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації* / Вінниц. нац. техн. ун-т .: тези доп. V Міжнар. наук.-практ. конф., Вінниця, 19–21 квіт. 2016 р. С. 39–41. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/13214>.

283. Журавська І. М., Мусієнко М. П. Мобільна система керування гетерогенною рухомою мережею безпілотних апаратів. *Зб. наук. праць Військ. ін-ту Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка*. Київ : ВІКНУ, 2017. Вип. 57. С. 30–40. URL: http://mil.univ.kiev.ua/files/240_1382369481.pdf.

284. Журавська І. М., Мусієнко М. П. Мобільний реєстратор завантаження/розвантаження великорозмірних об'єктів військово-цивільного призначення. *Військова освіта і наука: сьогодні та майбутнє* / Військ. ін-т Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка : тези доп. XIII Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 24 листоп. 2017 р. Київ : ВІКНУ, 2017. С. 37–38.

285. Журавська І. М., Мусієнко М. П. Синтез маршрутів суб-роїв безпілотних апаратів з використанням нейронної мережі Хопфілда для обстеження територій. *Radio Electronics, Computer Science, Control / Zaporizhzhya National Technical University*. 2017. No. 3. P. 86–94. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-3-10.

286. Журавська І. М., Мусієнко М. П., Кулаковська І. В. Автоматизована система обліку розвантаження суден контейнеровозів з використанням мобільних пристроїв. *Наук. вісник Херсон. держ. мор. академії* : наук. журн. 2017. Вип. 1 (16). С. 37–46.

287. Журавська І. М., Мусієнко М. П., Румянков Д. І. Блоковий метод шифрування для рухомих об'єктів з обмеженими обчислювальними ресурсами.

Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія / Вінниц. нац. політехн. ун-т. 2016. Т. 3, № 37. С. 28–32. URL: <http://itce.vntu.edu.ua/index.php/itce/article/view/523/394>.

288. Журавська І. М., Мусієнко М. П., Щебетюк В. О. Захист інформації щодо місцезнаходження БПЛА за допомогою стеганографічних рішень. *Інформація, комунікація, суспільство – 2016 (ICS – 2016)* / Нац. ун-т «Львів. політехніка»: тези доп. V Міжнар. наук. конф., Львів – Славське, 19–21 трав. 2016 р. С. 24–25. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/33285/1/04-24-25.pdf>.

289. Журавська І. М., Обухова К. О., Лавриненко С. В. Імплементация програмного забезпечення моніторингу та диспетчеризації навантаження ядер однокристального процесора. *Наукові праці: наук. журн.* / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Серія : Комп'ютерні технології : наук.-метод. журн. Миколаїв, 2017. Т. 308. Вип. 296. С. 77–82.

290. Журавська І. М., Олійник В. В. Підсистема катапультивання та визначення GPS-координат блоків БПЛА при критичному застосуванні. *Могілянські читання – 2016* / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. XIX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 14–18 листоп. 2016 р. Т. 5. С. 83-84.

291. Журавська І. М., Поліщук Д. В. Аналіз загроз у публічних бездротових мережах та захисту користувацьких даних. *Могілянські читання – 2015* / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. XVIII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 12–20 листоп. 2015 р. Т. 1. С. 78-79.

292. Журавська І. М., Попель М. І. Автоматизація фармацевтичного складу з використанням спеціалізованих роботів, дистанційного клімат-контролю та відеоспостереження. *Могілянські читання – 2014* / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. XVII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 17-21 листоп. 2014 р. С. 63.

293. Журавська І. М., Румянков Д. І. Корпоративний месенджер з шифруванням трафіку модифікованим блочним методом на базі операції XOR.

Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі (КІСМ – 2016) / Криворіз. нац. ун-т : тези доп. ІХ Всеукр. наук.-практ. конф., Кривий Ріг, 22–24 берез. 2016 р. С. 135–137.

294. Журавська І. М., Румянков Д. І. Система автоматичного керування на основі Arduino з мікроконтролером Atmega для прийняття рішень щодо керування польотом БПЛА. *Могилянські читання – 2016* / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. ХІХ Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 14-18 листоп. 2016 р. . Т. 5. С. 24–26.

295. Журавська І. М., Румянков Д. І. Створення модифікованого блокового методу шифрування на базі операції XOR для корпоративного месенджера. *Наукові праці* / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили : наук. журн. 2015. Т. 266, Вип. 254. С. 97–104 (Серія : Комп'ютерні технології). URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npchduct_2015_266_254_17.

296. Журавська І. М., Савінов В. Ю., Корецька О. О., Буренко В. О. Розподілення навантаження між багатоядерними обчислювачами для задач енергонезалежних інформаційно-вимірjuвальних мереж. *Наукові праці* / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили : наук. журн. 2017. Т. 307, Вип. 295. С. 42–46 (Серія : Комп'ютерні технології).

297. Журавська І. М., Савінов В. Ю., Лавриненко С. В., Обухова К. О. Імплементация програмного забезпечення моніторингу та диспетчеризації навантаження ядер процесору рухомого пристрою. *Могилянські читання-2017.* / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. ХХ Всеукр. наук.-метод. конф. Миколаїв, 13–17 листоп. 2017 р. С. 112–115 (Секція : Методи, моделі та інформаційні технології).

298. Журавська І. М., Собко Д. А., Салтан Б. А. Аналіз захищеності Wi-Fi та механізми розбудови безпечної мережі. *Могилянські читання – 2015* / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. ХVІІІ Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 12–20 листоп. 2015 р. Т. 1. С. 79–81.

299. Журавська І., Корецька О., Мусієнко М. Розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення. *Інтернет – Освіта – Наука – 2016* / Вінниц. нац. політехн. ун-т та [ін.] : матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф., Вінниця, 11–14 жовт. 2016 р. С. 79–81.

300. Журавська, І. М., Мусієнко М. П., Румянков Д. І. Підвищення ефективності шифрування керуючого трафіку БПЛА засобами модифікованого блокового методу. *Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації* / Вінниц. нац. техн. ун-т : тези доп. V Міжнар. наук.-практ. конф., Вінниця, 19-21 квіт. 2016 р. С. 75–77.

301. Заявка а 2018 06466 Україна, МПК (2014.04) В64С 29/04. Спосіб формування підйомної сили поліконструкції на основі тріади безпілотних літальних апаратів / І. М. Журавська ; заявник та патентовласник Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. № а 2018 06466 ; заявл. 20.06.2018. URL: <http://base.uipv.org/searchInvStat/showclaimdetails.php?IdClaim=302580&resId=1>.

302. Заявка а 2018 06478 Україна, МПК (2014.04) В64С 29/04. Спосіб формування підйомної сили безпілотного літального апарата для підйому і переміщення предметів у повітряному середовищі / І. М. Журавська, М. П. Мусієнко ; заявник та патентовласник Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. № а 2018 06478 ; заявл. 20.06.2018. URL: <http://base.uipv.org/searchInvStat/showclaimdetails.php?IdClaim=302587&resId=1>.

303. Збільшення точності визначення GPS координат. *Intelli: система контролю та моніторингу транспорту в Україні* : веб-сайт. URL: <http://intelli.com.ua/ua/statti/zbilshennia-tochnosti-vyznachennia-gps-koordynat.html>.

304. Згурец С. Беспилотники: призыв на войну. Київ : Defense Express, 2015. 96 с. (Серия : Оружие Украины).

305. Испытания нового украинского БПЛА «Лелека-100». Оpubл. 08.02.2017. URL: <https://bmpd.livejournal.com/2422228.html>.

306. Как выбрать дрон для различных задач? *Робототехника и дроны* : веб-сайт. Оpubл. 26.10.2018. URL: <https://robotics.ua>.

307. Квасников В. П., Дзюбаненко А. В. Улучшение визуального качества цифрового изображения путём поэлементного преобразования. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. Вып. 8. С. 200–204.

308. Квасников В. П., Бабич Л. О. Управление интеллектуальным мобильным роботом на основе гибридной нейро-нечеткой системы. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. № 7. С. 140–144.

309. Квасніков В. П., Орнатський Д. П., Гаврилов І. В. та ін. Способи побудови аналогових інтерфейсів інформаційно-вимірювальних систем механічних величин. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2013. № 1. С. 164–169.

310. Кветний Р. Н., Кулик А. Я. Методи та засоби передавання інформації у проблемно-орієнтованих розподілених комп'ютерних системах : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2010. 362 с.

311. Кветний Р. Н., Титарчук Є. О. Алгоритм частково гомоморфного шифрування на основі еліптичних кривих. *Контроль і управління в складних системах (КУСС – 2016)* : матеріали XIII Міжнар. конф., Вінниця, 3–6 жовт. 2016 р. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/13077>.

312. Китай підняв у повітря рекордний рій дронів. *Кореспондент*. Інтернет-видання. Оpubл. 12.06.2017. URL: <http://ua.korrespondent.net/tech/technews/3860820-kytai-pidniav-u-povitria-rekordnyi-rii-droniv>.

313. «Клешня» для дрона. Оpubл. 10.12.2015. URL: <https://naked-science.ru/article/concept/kleshnya-dlya-drona>.

314. Козленко В. Ethernet сети в системах управления транспортом. 2006. URL: http://www.moxa.com.ua/news_events/news/2006/mm_03_2006.htm.

315. Комашинский В. И., Смирнов Д. А. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. М. : Горячая линия-Телеком, 2003. 94 с.

316. Комп'ютерні мережі : навч. посіб. / О. Д. Азаров, С. М. Захарченко, О. В. Кадук та ін. Вінниця : ВНТУ, 2013. 371 с.

317. Комплекс с беспилотным летательным аппаратом «Форпост» / А. В. Карпенко. *Оружие Отечества. Оружие и военная техника* : выпуск сборника. Опубл. 14.01.2018. URL: <http://bastion-opk.ru/forpost/>.

318. Комплексне використання групи безпілотних літальних апаратів для задач промислово-екологічної розвідки / Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського» : наук.-дослід. робота (№ держ. реєстрації 0115U002524) / наук. керівник О. В. Збруцький. URL: http://report.kpi.ua/files/2016_2860.pdf.

319. Контейнер – КОНТРОЛЬ, система взвешивания контейнеров и распознавания их номеров. URL: <http://www.azpw.ru/node/24>.

320. Крылов В. Н., Максимов М. В., Давыдов В. О. Автоматизированная система распознавания. *Искусств. интеллект*. 2002. № 4. С. 462–464.

321. Кутковецкий В. Я. Дослідження операцій : навч. посіб. Київ : Професіонал, 2004. 350 с.

322. Кучук Г.А. Інформаційні технології управління інтегральними потоками даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах систем критичного призначення ; Харків. нац. ун-т Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. Харків : ХУПС, 2013. 254 с.

323. Левитин А. В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ. М. : Вильямс, 2006. 576 с.

324. Ленков С. В., Перегудов Д. А., Хорошко В. А. Методы и средства защиты информации : в 2-х т. Киев : Арий, 2008. Т. 1 : Несанкционированное получение информации. Т. 2 : Информационная безопасность. 344 с.

325. Ленков С. В., Шворов С. А., Болбот І. М. та ін. Дискретна векторна оптимізація траєкторій руху мобільних роботів. *Сучасна спеціальна техніка*. 2012. Вип. 1(28). С. 13–19.

326. Лужецький В. А., Остапенко А. В. Аналіз алгоритмів симетричного

блокового шифрування. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія* : міжнар. наук.-техн. журн. 2012. № 3. С. 55–64.

327. Лужецький В. А., Остапенко А. В. Блоковий шифр на основі псевдовипадкової послідовності криптопримітивів. *Системи обробки інформації*. 2010. Вип. 3(84). С. 136.

328. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. Москва : Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.

329. Миков А. И. Стохастические характеристики разрезов в графах AD НОС сетей. *Информатизация и связь*. 2014. № 1. С. 76–79.

330. Минухин С. В. Энергоэффективные алгоритмы масштабирования скорости процессоров вычислительного кластера. *Cluster Computing (CC'2013) : Proceedings of Second Int. Conf., Lviv, Ukraine, 3-5 June, 2013*. P. 131–140.

331. Мирошниченко Л. Н., Пусев А. Н., Журавская И. Н. Эффективное управление многоячеечными зарядными устройствами на базе однотоковых транзисторных инверторов. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий* : сб. науч. тр. / Отв. ред. В. В. Шамко. Киев : Наук. думка, 1995. Вып. 2. С. 107–110.

332. Мірошник М. А. Розробка засобів захисту інформації в розподілених комп'ютерних системах та мережах. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті* : наук.-технічн. журн. 2015. № 1. С. 18–25. DOI: 10.18664/ikszt.v0i1.51555.

333. Моисеев В. С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов : монография. Казань : Школа, 2015. 444 с.

334. Мудров В. И. Задача коммивояжера. М. : Знание, 1969. 62 с.

335. Мусієнко М. П., Журавська І. М. Алгоритми прокладання маршруту безпілотних літальних апаратів на основі застосування нейронних мереж Хопфілда. *Вісник Черкаського держ. технол. ун-ту* : зб. наук. праць. 2016. № 1. С. 20–27 (Серія : Технічні науки). URL: http://visnyk.chdtu.edu.ua/images/tech/1_2016/c20-27_Мусієнко_Журавська.pdf.

336. Мусієнко М. П., Журавська І. М. Система контролю безпілотних апаратів, заснована на використанні мобільних пристроїв. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво* / Луцьк. нац. техн. ун-т. 2017. Вип. 26. С. 199–203. URL: <http://ki.lutsk-ntu.com.ua/node/134/section/33>.

337. Мусієнко М. П., Журавська І. М., Бурлаченко І. С. та ін. Рухомі моніторингові мережі критичного застосування: проблеми створення та напрями розвитку. *Наукові праці* / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили : наук. журн. 2015. Т. 266, Вип. 254. С. 112–118 (Серія : Комп'ютерні технології).

338. Мусієнко М. П., Журавська І. М., Юрін Д. В. Аналіз безпеки механізмів обміну даними між наземним пунктом керування та безпілотним літальним апаратом. *Інформаційні технології та взаємодії (IT&I – 2015)* / Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка та [ін.] : тези доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 3–5 листоп. 2015 р. С. 47–48.

339. Найман В. С., Самойлов А. Е., Ильин Н. Р. и др. Все о GPS-навигаторах. М. : НТ Пресс, 2005. 392 с.

340. Накул Ю. А., В. О. Стовманенко Модель системи завантаження крупнотонажних суден. *Наукові праці* / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили : наук. журн. 2016. Т. 275, Вип. 287. С. 27–33 (Серія : Комп'ютерні технології).

341. Никольский В. В., Накул Ю. А., Стовматенко В. О. Система контролю завантаження контейнеровозів. *Судовождение*. 2017. Вип. 27. С. 127–136.

342. Никольский В. В., Хнюнин С. Г., Накул Ю. А. Выбор датчиков определения координат контейнера для компьютерной системы учета загрузки судна. *Автоматизация судовых технических средств* : науч.-техн. сб. 2017. Вып. 23. С. 57–64.

343. Нікольський В. В., Нікольський М. В., Накул Ю. А. Система підтримки прийняття рішення по навантаженню великотонажного контейнеровоза. *Наукові праці* / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили : наук. журн. 2016. Т. 271, Вип. 283. С. 70–73 (Серія : Комп'ютерні технології).

344. Один день на контейнеровозе. *Образовательный портал для судоводителей*. URL: <https://deckofficer.ru/news/item/odin-den-na-kontejnerovoze>.

345. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 4-е изд. СПб. : Питер, 2012. 943 с.

346. Опанасенко В. М., Лисовой О. М. Бортові проблемно-орієнтовані процесори для апаратної реалізації алгоритмів управління космічними апаратами. *Проблеми інформатизації та управління*. 2014. Т. 47, № 3. С. 71–75.

347. Опыт конечно-элементного моделирования в программе LS-DYNA в ОАО «Ульяновский НИИТ» – авиационное направление / М. В. Илюшкин. *Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России* : материалы III Междунар. научно-производств. конф. Россия, Ульяновск, 08 февраля 2018 г. С. 128–139.

348. Пат. на винахід 21356 Україна, МПК (2006.01) H03K 17/61. Спосіб передачі уніполярних прямокутних імпульсів через гальванічно розв'язане коло та пристрій для його здійснення / Л. М. Мірошніченко, І. М. Журавська, О. М. Пусєв. № 93007773; заявл. 08.12.93; держ. реєстр. 02.12.97; опубл. 30.04.98, Бюл. № 2. 11 с. URL: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=47479>.

349. Пат. на винахід 3031 Україна, МПК⁵ H01L 23/34. Пристрій для охолодження напівпровідникових приладів / І. М. Журавська, Л. М. Мірошніченко, О. М. Пусєв, О. С. Євстаф'єв, М. В. Турти. № 93300896; заявл. 16.03.93; держ. реєстр. 29.04.94; опубл. 26.12.94, Бюл. № 5. 10 с. URL: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=39424&chapter=biblio>.

350. Пат. на винахід 3033 Україна, МПК (2006.01) H02M 3/335. Багатоканальний перетворювач напруги / О. М. Пусєв, І. М. Журавська, Л. М. Мірошніченко, В. М. Рябенький. № 93300894; заявл. 16.03.93; держ. реєстр. 29.04.94; опубл. 26.12.94, Бюл. № 5-I. 8 с. URL: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=39426>.

351. Пат. на изобретение 2 155 702 РФ, МПК В64С 27/10. Система двух соосных несущих винтов летательного аппарата / Б. С. Малышев, А. И. Соловьев, Г. В. Зевиг и др. ; заявл. 15.04.1999 ; гос. регистр. 15.04.1999 ; опубл. 10.09.2000, Бюл. № 25. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2155702>.

352. Пат. на корисну модель 130195 Україна, МПК (2006.01) В64С 29/04. Спосіб формування підйомної сили спарених безпілотних літальних апаратів для підйому і переміщення предметів / І. М. Журавська. № u201806480 ; заявл. 11.06.2018 ; опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22.

353. Пат. на корисну модель 130607 Україна, МПК (2018.01) В64С 29/00. Спосіб формування підйомної сили безпілотних літальних апаратів з можливістю осьового розвороту корпусу апаратів, що виконують процедуру підйому і переміщення предметів / І. М. Журавська. № u 2018 08712 ; заявл. 14.08.2018 ; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23.

354. Пат. на корисну модель 130608 Україна, МПК (2006.01) В64С 39/02. Малогабаритна безпілотна авіаційна система повітряного спостереження з наземної станції контролю та управління / Д. І. Румянков, М. П. Мусієнко, І. М. Журавська, В. В. Олійник. № u 2018 08713 ; заявл. 14.08.2018 ; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23.

355. Петрівний О. І. Дослідження точності супутникових навігаційних систем. *Наукові читання – 2013* / Житомир. нац. агроєколог. ун-т : наук.-теорет. зб. 2013. Т. 1. С. 367–373.

356. Поисковый GPS трекер RF-V16 для DJI Phantom 3/4. URL: <http://coptertime.ru/catalog/multy-access/gps-tracker-dji-phantom/>.

357. Полетайкин А. Н., Гузь О. А., Каганюк А. К. Интеллектуальные средства и технологии инфраструктуры городского дорожного движения. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2014. Вып. 14. С. 155–163. URL: <http://ki.lutsk-ntu.com.ua/node/122/section/24>.

358. Поликарпова Н., Герасименко А. Методы решения труднорешаемых задач. С.-Петербург. нац. исслед. ун-т информ. технологий, механики и оптики

(ИТМО), 2007. URL: <http://rain.ifmo.ru/cat/view.php/theory/unsorted/approx-2004>.

359. Полынкин А. В., Ле Х. Т. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами. *Известия Тул. гос. ун-та. Техн. науки*. 2013. Т. 7-2. С. 98–107.

360. Правила повітряної експлуатації безпілотних повітряних суден в Україні (концепція) / Р. Байдуж : презентація. Опубл. 06.10.2017. URL: <https://www.slideshare.net/SAAU2017/ss-80646310>.

361. Прикладна криптологія. Теорія. Практика. Застосування : монографія / І. Д. Горбенко, Ю. І. Горбенко ; Харк. нац. ун-т радіоелектроніки, Приват. акціонер. т-во «Ін-т інформ. технологій». Вид. 2-ге. Харків : Форт, 2012. 878 с.

362. Про визначення можливості застосування радіоелектронних засобів на території України : рішення НКРЗІ від 19.12.2017 № 648. URL: <http://nkrzi.gov.ua/index.php?r=site/index&pg=342&id=7396&language=uk>.

363. Продукты и решения – Беспроводное оборудование – DAP-3310. *D-Link (Europe) Ltd* : веб-сайт. URL: http://www.dlink.ru/ru/products/2/1790_b.html.

364. Пролетарский А. В. Баскаков И.В., Федотов Р.А. и др. Беспроводные сети Wi-Fi. 2-е изд. М. : BINOM, 2016. 284 р.

365. Пролетарский А. В. Технологии защиты информации в компьютерных сетях / Моск. гос. техн. ун-т им. Баумана. М. : D-Link, 2013. 278 с.

366. Простая модель планировщика ОС. *Хабрахабр* : пост. Опубл. 12.10.2012. URL: <https://habrahabr.ru/post/154609/>.

367. Проценко М. М. Аналіз структури та варіантів побудови безпілотних авіаційних комплексів. *Вісн. Житомир. держ. техн. ун-ту*. 2012. № 2 (61). С.113–118.

368. Разведывательный беспилотный аппарат малого класса «Корсар» / А. В. Карпенко. *Военно-техн. сб. «Бастيون»* : журн. оборонно-промышл. комплекса. Опубл. 04.09.2015. URL: <http://bastion-karpenko.ru/korsar-bla/>.

369. Рекордное шоу дронов закончилось дронопадом. Опубл. 4 мая 2018 г.
URL: <https://shazoo.ru/2018/05/04/65093/rekordnoe-shou-dronov-zakonchilos-dronopadom>.

370. Российские войска установили в Донецке станцию радиоэлектронной борьбы «Красуха-4» и глушат беспилотники ОБСЕ. *Цензор.НЕТ* : веб-сайт. URL : https://censor.net.ua/photo_news/310972/rossiyiskie_voyiska_ustanovili_v_donetske_stantsiyu_radioelektronnoyi_borby_krasuha4_i_glushat_bespilotniki.

371. Рудницький В. М., Бабенко В. Г. Синтез математичних моделей пристроїв декодування інформації для криптографічних систем. *Системи обробки інформації*. 2009. Вип. 2 (76). С. 124–128.

372. Рудницький В. М., Костирка О. В. Стійке стеганоперетворення в просторовій області зображення-контейнера. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2013. Вип. 3, № 4. С. 353–360.

373. Румянков Д. І., Журавська І. М. Проектування системи керування безпілотним літальним пристроєм на основі мікроконтролерів Atmega на базі Arduino. *Інтелектуальні інформаційні системи – 2017* / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили : тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф., Миколаїв, 15–17 лют. 2017 р. С. 126–128.

374. Рябенський В. М., Ушкаренко А. О. Формальное описание элементов автоматизированного рабочего места оператора электроэнергетической системы. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2014. № 1 (10). С. 43-50.

375. Савчук С. Г. Проблемні питання під час використання сучасних супутникових технологій визначення координат. *Геодезія, картографія і аерофотознімання* / Нац. ун-т «Львівська політехніка». 2007. Вип. 69. С. 20-33.

376. Саченко А. О., Кочан В. В., Харченко В. С., Яцків В. В. та ін. Концепція побудови мобільних систем пост-аварійного моніторингу АЕС з використанням флоту квадрокоптерів. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*.

2016. № 5(79). С. 207–214. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2016_5_34.

377. Семенов С. Г., Гавриленко С. Ю., Давыдов В. В. Защита данных в компьютеризированных управляющих системах. Саарбрюккен, Германия : LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 236 с.

378. Сидоренко Б. Микроконтроллеры Atmel SAM D – Cortex-M0+: оптимальное соотношение производительности и энергоэффективности. *Электроника: наука | технология | бизнес*. 2014. № 3 (00134). С. 78–85.

379. Синицкая И. Firebase Analytics: настраиваем аналитику мобильных приложений. *Netpeak Blog* : веб-аналитика. URL: <https://netpeak.net/ru/blog/nastraivaem-analitiku-mobilnyh-prilozheniy-s-pomoshchyu-firebase-analytics/>.

380. Ситников В. С., Троян А. П. Динамическое планирование действий автономной мобильной робототехнической системы. *Наук. вісн. Чернів. ун-ту*. 2011. Т. 2, № 2. С. 30–33 (Серія : Комп'ютерні системи та компоненти).

381. Скворцов А. В., Мирза Н. С. Алгоритмы построения и анализа триангуляции. Томск : Изд-во Томского ун-та, 2006. 168 с.

382. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / под ред. М. Д. Красильщикова, Г. Г. Серебрякова. М. : Физматлит, 2009. 556 с.

383. Субботин С.А. Формирование выборок и анализ качества моделей на основе нейронных и нейро-нечётких сетей в задачах диагностики и распознавания образов : монография. Саарбрюккен, Германия : LAP Lambert academic publishing, 2012. 232 с.

384. Терентьев В. М. Задача управления полетом ДПЛА в групповых порядках и способы и средства ее решения. *Авиакосмическое приборостроение*. 2009. №. 1. С. 10–25.

385. Тимочко О. І., Голубничий Д. Ю., Третяк В. Ф. та ін. Класифікація безпілотних літальних апаратів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2007. Вип. 1 (9). С. 61–66. URL: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic->

app/article/1045/soivt_2007_1_19.pdf.

386. Тимчасовий порядок використання повітряного простору України (ВППУ): затв. Держ. авіац. службою України 31.05.2018. 169 с. URL: https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2018/05/ТУМЧАСОВУУJ-poryadok-VPPU_31.05.18-2.doc.

387. Трунов О. М. Розвиток методів та засобів створення аск глибоководними технологічними комплексами : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.07 – автоматизація процесів керування / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Херсон, 2017. 44 с.

388. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. М. : Мир, 1992. 240 с.

389. Учайкин В. В. Эта странная кинетика. *Сб. научно-популярных статей РФФИ*; под ред. В. П. Скулачева. М. : Октопус, 2003. С. 24–33. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_14710#1.

390. Ушаков Д. В. Организация контейнерных перевозок грузов. М. : ТрансЛит, 2015. 208 с.

391. Фісун М. Т., Журавська І. М., Горбань Г. В. Використання OLAP-технології для аналізу мережевого трафіку засобами об'єктної СКБД. *Комп'ютерні системи та мережеві технології (CSNT'2012)* / Нац. авіац. ун-т : тези доп. V Міжнар. наук.-техн. конф. Київ, 13–15 черв. 2012 р. С. 129.

392. Фісун М. Т., Журавська І. М., Горбань Г. В. Інтеграція даних мережевого трафіку мультисервісної корпоративної мережі з класами постріляційної СКБД Caché. *Наукові праці* : наук. журн. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. 2011. Т. 173, Вип. 161. С. 105–110 (Серія : Комп'ютерні технології). URL: <http://lib.chdu.edu.ua/pdf/naukpraci/computer/2011/173-161-16.pdf>.

393. Фісун М. Т., Журавська І. М., Горбань Г. В. Інтеграція даних щодо мережевого трафіку мультисервісної корпоративної мережі з класами постріляційної СКБД Caché. *Комп'ютерні системи та мережеві технології*

(CSNT'2011) / Нац. авіац. ун-т : тези доп. IV Міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 14–16 черв. 2011 р. С. 63.

394. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. М. : Вильямс, 2008. 1103 с.

395. Харди Б., Филлипс Б., Стюарт К. и др. Android. Программирование для профессионалов. 2-е изд. СПб. : Питер, 2016. 640 с.

396. Харченко О. И., Чумаков В. И. Использование нелинейных систем с памятью для выделения полезного сигнала из аддитивной смеси гармонического колебания и гаусова шума. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2010. № 2. С. 117–122.

397. Хламов С. В., Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Орышич С. С. Разработка вычислительного метода обнаружения околонулевого видимого движения объектов на серии CCD-кадров. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. Т. 2, № 9 (80). С. 41–48. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65999.

398. Шульц Р. В., Крельштейн П. Д., Маліна І. А. Дослідження систематичних похибок інерціальної навігаційної системи при аерофотозніманні з безпілотних літальних апаратів. *ScienceRise : scientific journal*. 2015. № 9/2 (14). С. 6–18. DOI: 10.15587/2313-8416.2015.49183.

399. Юдін О. К. Кодування в інформаційно-комунікаційних мережах : монографія. Київ : НАУ, 2007. 308 с.

400. Яцків В. В. Теоретичні основи створення і структурна організація компонентів безпроводних сенсорних мереж підвищеної ефективності : автореф. дис... д-ра техн. наук : 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2016. 40 с.

Додаток А

Характеристики використаних систем та компонентів

А.1 Порівняння функцій автопілотів різних виробників

Порівняння функцій автопілотів різних виробників наведено в табл. А.1.

SmartAP – це покоління систем управління польотом для мультироторних безпілотних літальних апаратів, що здатні здійснювати повністю автономний політ [5].

Дана система має потужний мікроконтролер STM32F4 від виробника ST Microelectronics, 9-осьовий інерціальний вимірювальний блок та сучасний GPS приймач UBlox, інтегрований в системну плату. SmartAP підтримує будь-який тип мультироторних БПЛА. SmartAP розроблений з використанням новітніх електронних компонентів, які доступні в даний момент, що дозволило досягти високих результатів.

Загальні характеристики автопілоту наведені нижче [60]:

- мікроконтролер 32 біт, 168 МГц STM32F4 на ядрі Cortex M4;
- вага 60 г;
- GPS-приймач (UBlox NEO8, GPS/ГЛОНАСС, 10 Гц);
- інтегрований модуль телеметрії (100 мВт), зовнішній модуль також підтримується;
- USB-інтерфейс для конфігурації;
- інтерфейси UART/модуля USART, інтерфейсу RS-232, інтерфейсів I2C та SPI.

Сенсори, якими обладнаний апаратний модуль:

- магнітометр (Honeywell HMC5883L);
- барометр (MS5611);
- гіростабілізатор (InvenSense MPU-9150);

Даний автопілот дозволяє керувати пристроями в трьох режимах: під управлінням оператора, в напівавтоматичному режимі (підтримка поточного стану), та в повністю автоматичному режимі в залежності від задачі. Система

позиціонування дозволяє керувати висотою з точністю до 10 см та положенням в просторі до 40 см. Також має імплементовану систему автоповернення до місця старту.

Зовнішній вигляд системи автопілотування SmartAP зображено на рис. А.1.



Рисунок А.1 – Апаратний модуль системи автопілотування SmartAP [60]

Програмне забезпечення для даного апаратного модуля розповсюджується безкоштовно та має добре документовані зовнішні інтерфейси, що дозволяє модифікувати дану систему для вирішення широкого кола задач.

Vector – це повністю інтегрований автопілот від виробника Eagle Tree (США) для використання в сучасних повітряних БПЛА і платформ, де важлива автономність та висока кінцева продуктивність польоту [203]. Дане рішення сумісне з усіма типами платформ, в тому числі з фіксованим крилом та мультироторних БПЛА; він також підходить в якості бази для управління польотом системи опціонально-пілотованого корабля (ОПК) або перетворення пілотованих літаків у БПЛА.

Vector – це повноцінний та самодостатній автопілот, він оснащений всіма необхідними сенсорами та обчислювальними пристроями та працює як єдина система управління польотом, яка має наступні характеристики:

- рівень захисту IP67;
- двоядерний процесор для управління польотом;

– відкритий рівень конфігурації, що надає можливість широкої модифікації автопілоту;

– інтегровану систему POLAR, що забезпечує Vector набором необхідних датчиків (GPS, альтиметр, гіроскоп) для забезпечення ефективного управління польотом;

На рис. А.2 наведено узагальнену структурну модель автопілоту на прикладі системи Vector.

Головні особливості автопілоту наведені нижче:

– ОС реального часу, що дозволяє забезпечити безвідмовну роботу системи за рахунок пріоритезації завдань, за якого основні ресурси системи використовуються для підтримки польоту;

– повний набір засобів сповіщення;

– сучасні алгоритми позиціонування;

– механізми забезпечення постійного зв'язку;

– автоматизація систем управління БПЛА (автоматичний зліт/посадка та інше).

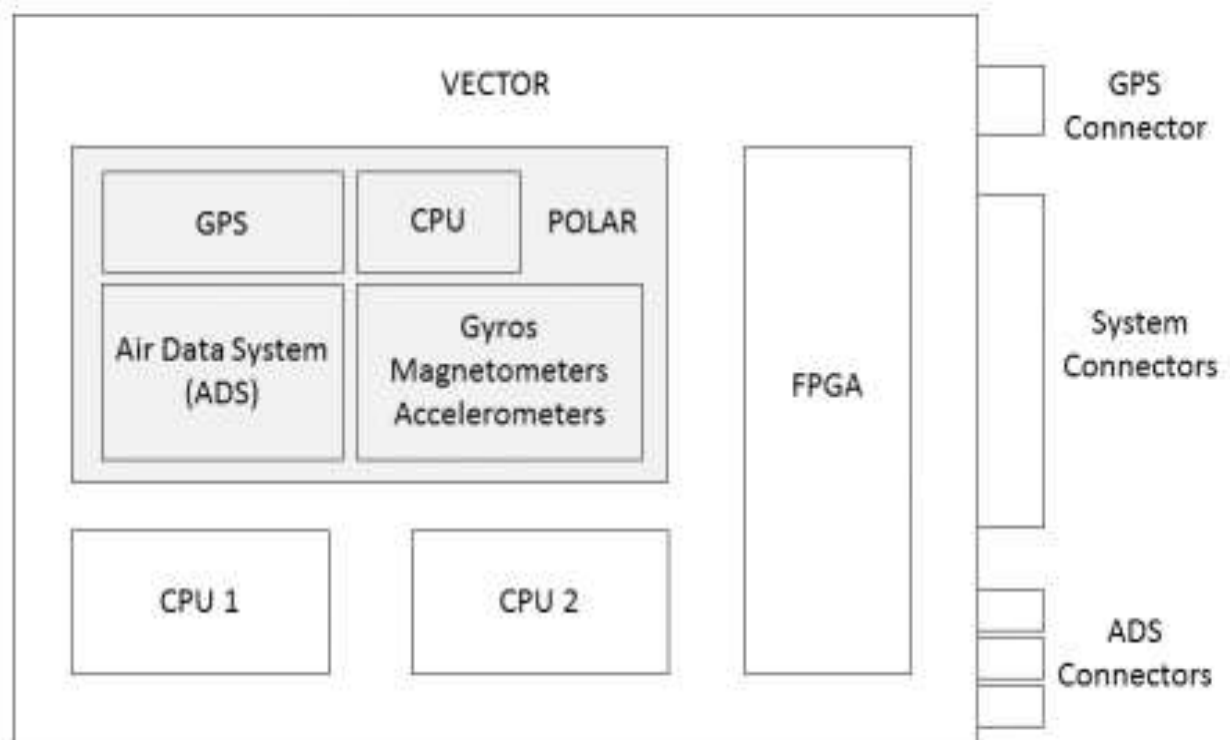


Рисунок А.2 – Структурна схема побудови системи автопілотування Vector

Польотний контролер ArduPilot Mega є повноцінним рішенням БПЛА, який дозволяє крім радіокерованого дистанційного пілотування – автоматичне управління по заздалегідь створеному маршруту, тобто політ по точкам (до 166), а так само має можливість двосторонньої передачі телеметричних даних з борту на наземну станцію (телефон, планшет, ноутбук, тощо) і ведення журналу у вбудовану пам'ять.

Контролер ArduPilot Mega заснований на автопілоті APM 2.x, які розробляються спільнотою DIY Drones і базується на Open-Source проекті, що дозволяє перетворити будь-який апарат в автономний [11].

Pixhawk – це нова, розвинута система автопілоту, побудована на базі проекту з відкритими вихідними кодами PX4 і виготовленою компанією 3D Robotics (3DR). Серед основних достоїнств можна відзначити потужний 32-бітний процесор і сенсор від компанії ST Microelectronics® та оперативну систему реального часу NuttX, що забезпечує високу продуктивність, гнучкість і надійність при управлінні будь-яким автономним пристроєм. Система вміщується microSD-карті обсягом 8 Гбайт, з яких 7,2 Гбайт займає розділ під польотні логи [153].

При включенні контролер створює WiFi-мережу. Доступ до контролеру здійснюється за IP-адресою засобами протоколу SSH.

Система автопілота 3DR Pixhawk може досягти необхідної швидкості польоту 20 м/с, несучи на борту камери та інші датчики, такі як LIDAR, сонар і модулі інерціального виміру.

Останні версії апаратно-програмного забезпечення функції автопілотування квадрокоптерів компанії DJI з інтегрованими програмними рішеннями від компанії Auto Flight Logic LLC набули суттєвих вдосконалень [16].

У порівнянні с іншими автопілотами, зазначений автопілот обладнаний зараз замість 4 камер для зондування простору 6 камерами-датчиками на задній панелі. Це забезпечує огляд по 5 напрямках, що дозволяє ще краще уникати перешкод. Зазначені камери у комплекті з парою сенсорів на передній панелі, а

також набору інфрачервоних систем зондування по ліву і праву сторону, забезпечують коптеру повний огляд простору і можливість визначати перешкоди на відстані 30 м від себе. Виявивши перешкоди (стіни, гілки, дах), апарат самостійно обчислює найбільш зручний спосіб повернути від них, і якщо не знаходить нового маршрути, то буде чекати команд оператора.

Крім того, останні моделі Phantom (Phantom 4 та вищі) літають найбільш довго – 30 хвилин без підзарядки за рахунок більш ємнісного акумулятора LiPo (5870 мА·год).

Всі польотні режими зберігаються, як у попередників.

У режимі Sport («швидка гонка») дрон розвиває швидкість до 72 км/год.

Новий 1-дюймовий 20-мегапіксельний сенсор CMOS і має розширені можливості для розпізнавання образів у порівнянні з попередніми моделями завдяки управлінню різкістю, візуальними ефектами і яскравістю кадрів.

Відстань передачі сигналу онлайн збільшена до 5–7 км, що дозволяє поглибити дослідження у напрямі розроблення нових топологій РММ зі зменшеною кількістю трансферних вузлів.

Налагодження режимів роботи апаратних компонентів квадрокоптерів компанії DJI забезпечується лінійкою відповідних програмних продуктів:

- 1) DJI Lightbridge;
- 2) DJI Ultimate Flight;
- 3) DJI Ronin Assistant;
- 4) DJI Go.

	APM	DJI (Naza w/ GPS)	DJI (Wookong-M Waypoint)	ZeroUAV (YS-X4 low end)	ZeroUAV (YS-X6 high end)	Mikrokopter	Hoverfly Pro w/ GPS	uThere (Ruby)
Contents	Autopilot, GPS, Power Monitor, Long-Range Telemetry	Autopilot, GPS, Power Monitor	Autopilot, GPS, Power Monitor, Telemetry, 50 waypoint package	Autopilot, GPS, Power Monitor, Telemetry, 8 waypoint package	Autopilot, GPS, Power Monitor, Long-Range Telemetry, 16 waypoint package	Autopilot, GPS, Power Monitor, Long-Range Telemetry, 100 waypoint package	Autopilot, GPS only	Autopilot, GPS
List Price	\$249	\$399	\$3000	\$639	\$2700	~\$2500	\$900	\$345
Full autonomy	Yes	RTL only	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Waypoints (# supported)	166	1	50	8 w/in 500m (Navigator)	16 w/in 500m (Standard)	100 w/in 250m	1	1
In-flight Route Editing	Yes	No	Yes	Guided Mode Only	Guided Mode Only	Yes	No	No
Wireless Configuration	Yes (Radio Telemetry)	No	Yes (Bluetooth)	No	No	No	No	No
Geo-Fence Support	Yes	No	No	No	No	No	No	No
Robust Simulation (HIL/SIL)	Both	No	HIL Only	No	No	SIL Only	No	No
Open Source Tools and Code	Yes	No	No	No	No	No	No	No
Open Source Communication Protocol	Yes (MAVLink)	No	No	No	No	No	No	No
Tricopter (+ and x)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Hexacopter	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Octocopter	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Y6	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No
X8	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No
Traditional helicopters	Yes	No	Yes (Ace One)	No	No	No	No	No
Fixed-wing Aircraft	Yes	No	No	No	No	No	No	Yes
Rovers	Yes	No	No	No	No	No	No	No
Boats	Yes	No	No	No	No	No	No	No

Таблиця А.1 – Порівняння функцій автопілотів різних виробників [118]

А.2 Апаратні засоби (БПЛА) для натурального моделювання поведінки зграї



Рисунок А.3 – Дрони DJI Phantom 4 (а) та UDIRC LarkFPV (б) [54, 110]

Таблиця А.2 – Технічні характеристики дронів суб-рою, вибраних для моделювання групової взаємодії [54, 110]

Технічні характеристики дронів	DJI Phantom 4	UDIRC LarkFPV
Розмір по діагоналі, мм	590	580
Горизонтальний розмір без гвинтів, мм	350	370
Діаметр гвинта, мм	232	190
Вертикальний розмір, мм	210	120
Кількість двигунів: безколекторні електричні, шт.	4	4
Ємність акумулятора, мА•год	5350	1000
Максимальний час польоту, хв	25–28	8–10
Швидкість в інтелектуальному режимі (Attitude або АТТІ mode, підтримка висоти), км/год (м/с)	57,6 (16)	25 (7)
Максимальна дальність польоту, м	5000–7000	80–200
Вага, г	1380	250

А.3 Характеристики WiFi-модулів різних виробників

Таблиця А.3 – Характеристики WiFi-модулів різних виробників

Назва мікросхеми з вбудованим WiFi-модулем	Наявність T/R	Потужність передавача (T), дБм (мВт)	Чутливість приймача (R), дБі	Стандарт передачі даних (частота)	Максимальна швидкість передачі даних, Мбіт/с
Broadcom BCM4330	1T1R	18/	-93/-76/-62	b/g/n	72
Nater RL-UM12BS-8188EUS (Realtek RTL8188EUS)	1T1R	18/14/13	-86/-73/-66	b/g/n 13 каналів	11/54/150
Realtek <u>RTL8192CU</u>	2T2R Multiple BSSID	Не визначена	Не визначена	b/g/n	144.4/300 (полоса 20/40 МГц)
Ralink RT5350F, RT3050F	1T/1R	17/14/11 (50/25/12,5)	-83/-70/-64	b/g/n (2,412 ~ 2,462 ГГц) 11 каналів	11/54/130
Ralink RT3052	2T2R	Не визначена	Не визначена	b/g/n	300
Qualcomm Atheros AR9331	1T1R	Не визначена	Не визначена	b/g/n	72/150 (20/40 МГц)
Espressif ESP8266	1T1R	25/...	Не визначена	b/g/n	10

А.4 Апаратні компоненти та ПЗ для натурального моделювання стеганографічних рішень при передачі даних між БПЛА



Рисунок А.4 – Контролер АТmega32 (а) з програматором USBasp v2.0 (б) для АТmega32



Рисунок А.5 – Плата STM32F429 Discovery

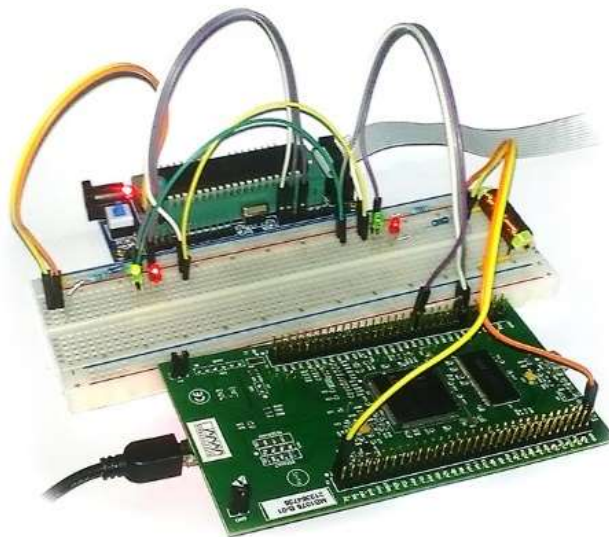
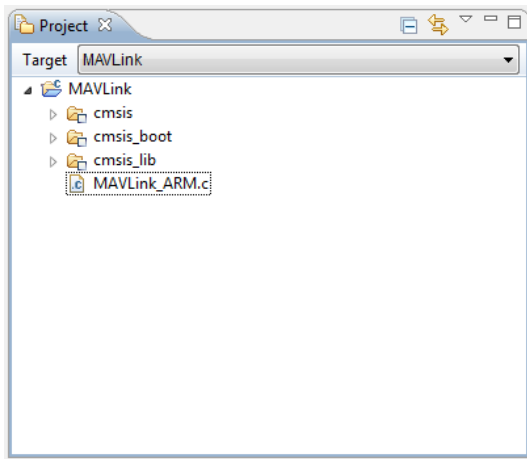
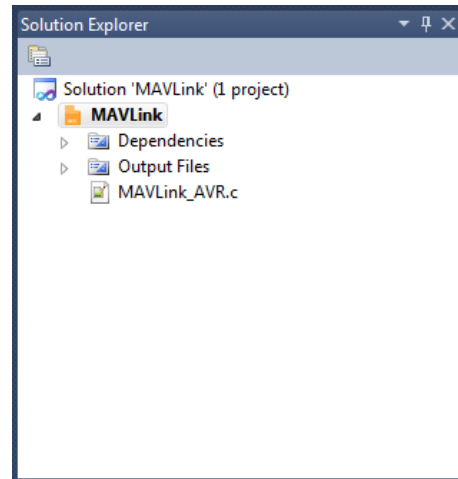


Рисунок А.6 – Кінцевий вигляд макету для натурального моделювання стеганографічних рішень



а)



б)

Рисунок А.7 – Проекти в CoIDE (а) та AVR Studio 5.0 (б)

Имя	Тип	Размер
cmsis	Папка с файлами	
cmsis_boot	Папка с файлами	
cmsis_lib	Папка с файлами	
syscalls	Папка с файлами	
componentfile.history	Файл "HISTORY"	1 КБ
MAVLink.avrgccproj	AVR GCC Project File	5 КБ
MAVLink.avrsln	AVR Studio 5 Solution File	1 КБ
MAVLink.avrsuo	Файл "AVRSUO"	26 КБ
MAVLink.cogui	Файл "COGUI"	26 КБ
MAVLink.comarker	Файл "COMARKER"	1 КБ
MAVLink.coproj	CoIDE Project	6 КБ
MAVLink_ARM.c	Файл "C"	2 КБ
MAVLink_AVR.c	Файл "C"	2 КБ

Рисунок А.8 – Структура спільної папки проекту для середовищ розробки CoIDE та AVR Studio 5.0

Имя	Тип	Размер
ardupilotmega	Папка с файлами	
ASLUAV	Папка с файлами	
autoquad	Папка с файлами	
common	Папка с файлами	
matrixpilot	Папка с файлами	
message_definitions	Папка с файлами	
minimal	Папка с файлами	
slugs	Папка с файлами	
test	Папка с файлами	
ualberta	Папка с файлами	
checksum.h	Файл "H"	3 КБ
mavlink_conversions.h	Файл "H"	7 КБ
mavlink_helpers.h	Файл "H"	22 КБ
mavlink_types.h	Файл "H"	9 КБ
protocol.h	Файл "H"	13 КБ

Рисунок А.9 – Бібліотека MAVLink для мови програмування C [120]

```
python -m mavgenerate
pause
```

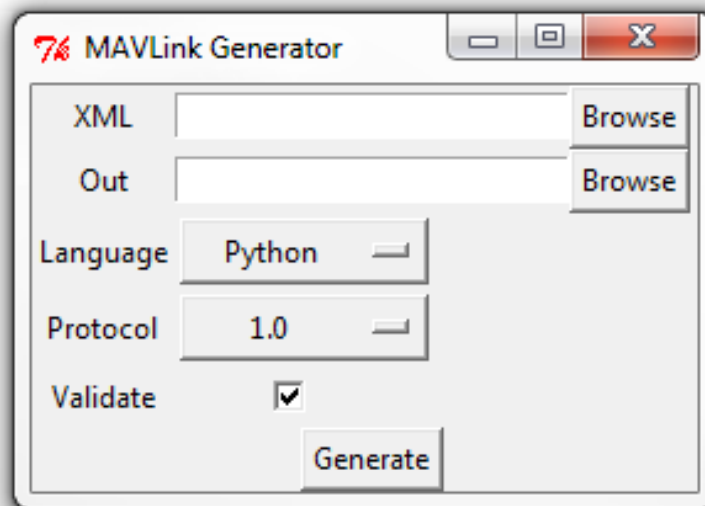


Рисунок А.10– Вікно інтерфейсу генератора MAVLink-повідомлень

Имя	Тип	Размер
ardupilotmega	Папка с файлами	
ASLUAV	Папка с файлами	
autoquad	Папка с файлами	
common	Папка с файлами	
matrixpilot	Папка с файлами	
message_definitions	Папка с файлами	
minimal	Папка с файлами	
slugs	Папка с файлами	
test	Папка с файлами	
ualberta	Папка с файлами	
checksum.h	Файл ".h"	3 КБ
mavlink_conversions.h	Файл ".h"	7 КБ
mavlink_helpers.h	Файл ".h"	22 КБ
mavlink_types.h	Файл ".h"	9 КБ
protocol.h	Файл ".h"	13 КБ

а)

Имя	Тип	Размер
ardupilotmega	Папка с файлами	
ASLUAV	Папка с файлами	
autoquad	Папка с файлами	
common	Папка с файлами	
matrixpilot	Папка с файлами	
message_definitions	Папка с файлами	
minimal	Папка с файлами	
sensors_data	Папка с файлами	
slugs	Папка с файлами	
test	Папка с файлами	
ualberta	Папка с файлами	
checksum.h	Файл ".h"	3 КБ
mavlink_conversions.h	Файл ".h"	7 КБ
mavlink_helpers.h	Файл ".h"	22 КБ
mavlink_types.h	Файл ".h"	9 КБ
protocol.h	Файл ".h"	13 КБ

б)

Рисунок А.11 – Структура бібліотеки MAVLink до компіляції (а) та після компіляції (б)

```

#include <sensors_data/mavlink.h>

static mavlink_system_t mavlink_system;
static mavlink_message_t msg;
static mavlink_sensors_data_t data;
static gps_data gps;
static uint8_t buf[MAVLINK_MAX_PACKET_LEN];
static uint16_t buflen;

int main(){
    mavlink_system.sysid = 200;
    mavlink_system.compid = MAV_COMP_ID_IMU;

    /* налаштування даних для gps та data */

    mavlink_msg_sensors_data_encode( mavlink_system.sysid,
                                     mavlink_system.compid,
                                     &msg, &data);
    buflen = mavlink_msg_to_send_buffer(buf, &msg);

    /* main loop */
}

```

Рисунок А.12 – Лістинг коду ініціалізації протоколу MAVLink

А.5 Апаратні компоненти та ПЗ для натурального моделювання методу бездротового управління почерговим підключенням пристроїв головного та підпорядкованих БПЛА зграї до джерела електроживлення обмеженої потужності

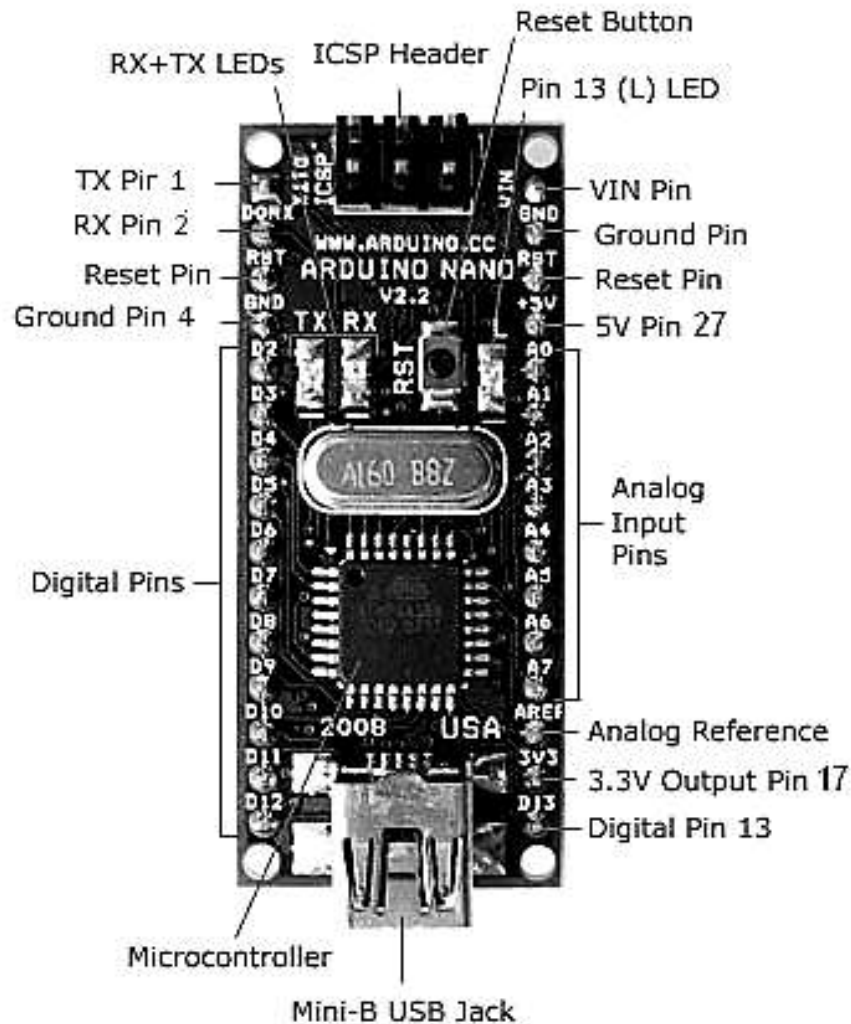


Рисунок А.13 – Виводи плати Arduino Nano 3.0



Рисунок А.14 – BT-модуль HC-05 (6 pin) для Master-пристроїв

```

#include <SoftwareSerial.h>
#include <PZEM004T.h>

SoftwareSerial mySerial(6, 5); // RX, TX
PZEM004T pzem(10,11); // (RX,TX) connect to TX,RX of PZEM
IPAddress ip(192,168,1,1);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pzem.setAddress(ip);
  pinMode(9,OUTPUT); digitalWrite(9,HIGH);
  mySerial.begin(38400);
}

void loop()
{
  float p = pzem.power(ip);
  if(p > 0.0){ mySerial.write('1'); }
  else {mySerial.write('0');}
}

```

Рисунок А.15 – Лістинг коду для радіозв'язку BT-модуля на БПЛА-Г з BT-модулем Slave-пристрою

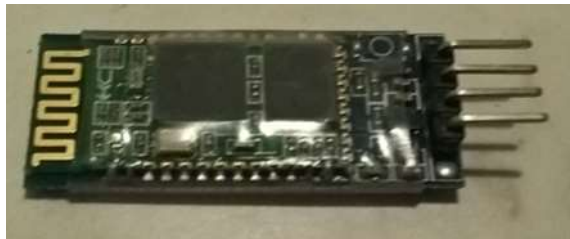


Рисунок А.16 – BT-модуль HC-06 (4 pin) для Slave-пристроїв

```
#include <SoftwareSerial.h>

SoftwareSerial mySerial(5, 6); // RX, TX

int test = 0;
int Relay = 4;

void setup() {
  pinMode(13, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  pinMode(Relay, OUTPUT);digitalWrite(Relay,HIGH);
  pinMode(9,OUTPUT); digitalWrite(9,HIGH);
  mySerial.begin(9600);
}

void loop()
{
  if (mySerial.available() > 0){
    test = mySerial.read();
  }
  if (test == '1') {
    digitalWrite(13, HIGH); // LED ON
    digitalWrite(Relay, LOW);
  }
  else if (test == '0') {
    digitalWrite(13, LOW); // LED OFF
    digitalWrite(Relay, HIGH);
  }
}
```

Рисунок А.17 – Лістинг коду ПЗ для ВТ-модуля неперіоритетного пристрою

Додаток Б

Програмний застосунок та результати моделювання руху БПЛА

Б.1 Моделювання збільшення довжини траєкторії БПЛА з урахуванням зовнішніх збурень та дрейфом (MATLAB)

Програмний код застосунку для моделювання у середовищі MATLAB збільшення довжини траєкторії БПЛА з урахуванням зовнішніх збурень та дрейфом:

```
%Численный метод. Эйлера-Маруямы-Леви на линейных СДУ
% Статистич. диф. уравн is dR = lambda*R dt + mu*R dW,
% R(0) = Rzero,- начальное условие
% Где lambda = [0.5 1 1.5 2 3], mu = 1 and Rzero = 1.
% Дискретизированный броуновский путь [0,1] has dt = 2^(-8).
% Эйлер-Маруяма использует временной шаг R*dt.
clear;clc; close all
randn('state',100)
%% ===== Параметры задачи =====
mu = 1; %Коэффициент дрейфа
col=['k' 'r' 'm' 'g' 'b'];
lambda=[0.5 1 1.5 2 3]; % Набор значений коэффициентов диффузии
%% Решение СДУ Блэка-Шоулза-Леви -точное решение
disp('=== Решение СДУ Блэка-Шоулза -точное решение ===')
disp(' ')
disp('Значения пройденного частицами пути при разных lambda')
for i=1:numel(lambda)
randn('state',200)
Rzero = 1; % Начальное положение частицы
T = 1; N = 2^8; dt = 1/N;
dW = sqrt(dt)*randn(1,N); % Броуновские приращения
dW = (1 - sqrt(dt)*randn(1,N)).^(1-sigma); % прогулка Леви
W = cumsum(dW); % дискретный броуновский путь
Rtrue{i} = Rzero*exp((lambda(i)-0.5*mu^2).*(dt:dt:T)+mu*W);% Точное решение диффузия+броуновск
движение
% Построение графиков перемещения R(t) при 5-и значениях mu
plot([0:dt:T],[Rzero,Rtrue{i}],col(i)), hold on
%===== Вычисление длины пути =====
Dd{i}=abs(diff(Rtrue{i}));% Отрезки пути, пройденные за каждый интервал времени dt
S{i}=cumsum(Dd{i}); % Накопительная сумма пройденных отрезков за время dt
Sk{i}=S{i}(end);% Длина полного пути частицы за время T
disp([' lambda=',num2str(lambda(i)), ' Sk= ',num2str(Sk{i})])
end
grid
% Подпись осей и графиков R(t)
title('Изменение координаты со временем - точное решение')
xlabel('t','FontSize',12)
ylabel('R(t)','FontSize',16,'Rotation',0,'HorizontalAlignment','right')
legend('lambda=0.5','lambda=1','lambda=1.5','lambda=2','lambda=3','Location','northwest')
figure
% Построение графиков изменение пути S(t) со временем
for i= 1: numel(lambda)
```



```

    plot([0:dt:T-dt],[Rzero,S{i}],col(i)); hold on
xlabel('Время t');
ylabel('S(t)')
end
grid
% Подпись осей и графиков пройденного пути S(t)
title('Изменение пройденного пути S(t) со временем - точное решение')
legend('lambda=0.5','lambda=1','lambda=1.5','lambda=2','lambda=3','Location','northwest')
xlabel('t','FontSize',12)
ylabel('S(t)','FontSize',16,'Rotation',0,'HorizontalAlignment','right')

%% ===== Численное решение методом Эйлера-Маруямы =====
R = 1; Dt = R*dt; L = N/R; % L EM steps of size Dt = R*dt
Rem = zeros(4,L); % preallocate for efficiency
dW = sqrt(dt)*randn(1,N); % Броуновские приращения
Rzero = 1; % Начальное положение частицы
disp(' ')
disp(' ===== Численный метод решения Эйлера-Маруямы-Леви =====')
disp(' ')
disp('Значения пройденного частицами пути при разных lambda')
figure
for i=1:numel(lambda)
    Rtemp(i) = Rzero;
    randn('state',200)
sigma = 2; % Индекс устойчивости Леви
    dW = (1 - sqrt(dt)*randn(1,N)).^(1-sigma); % Прогулка Леви
for j = 1:L
    Winc = sum(dW(R*(j-1)+1:R*j));
    Rtemp(i) = Rtemp(i) + Dt*lambda(i)*Rtemp(i) + mu*Rtemp(i)*Winc; % Комбинация дрейфа, диффузии
    Броун. движ. и прогулки Леви
    Rem(i,j) = Rtemp(i);
end
plot([0:Dt:T],[Rzero,Rem(i,:)],col(i)),hold on
% ===== Вычисление длины пути =====
Dde{i}=abs(diff(Rem(i,:))); % Отрезки пути, пройденные за каждый интервал времени dt
Se{i}=cumsum(Dde{i}); % Накопительная сумма пройденных отрезков за время dt
Sek{i}=Se{i}(end); % длина полного пути частицы за время T
disp([' lambda=',num2str(lambda(i)), ' Sek= ',num2str(Sek{i})])
end
% Подпись осей и графиков R(t)
grid
title('Изменение координаты со временем метод Эйлера-Маруямы')
xlabel('t','FontSize',12)
ylabel('R(t)','FontSize',16,'Rotation',0,'HorizontalAlignment','right')
legend('lambda=0.5','lambda=1','lambda=1.5','lambda=2','lambda=3','Location','northwest')
disp(' ')
disp('Относительные погрешности длины пути для 2-х методов, %')
% Построение зависимостей пройденного пути от времени
% и расчет погрешностей
figure
for i=1:numel(lambda)
plot([0:Dt:T-Dt],[Rzero,Se{i}],col(i)); hold on
% Расчет относительных погрешностей пройденного пути двух методов
ErrS(i) = abs(Sk{i}-Sek{i})./Sk{i}*100;
fprintf(' lambda=%3.1f ErrS=%5.3f \n', [lambda(i); ErrS(i)])
end

```

Результаты (MATLAB)

=== Решение СДУ Блэка-Шоулза-Леви -точное решение =====

Значения пройденного частицами пути при разных lambda

lambda=0.5 Sk= 21.374
 lambda=1 Sk= 26.5002
 lambda=1.5 Sk= 33.399
 lambda=2 Sk= 42.7917
 lambda=3 Sk= 74.041

===== Численный метод решения Эйлера-Маруямы-Леви =====

Значения пройденного частицами пути при разных lambda

lambda=0.5 Sek= 21.1318
 lambda=1 Sek= 26.186
 lambda=1.5 Sek= 32.9578
 lambda=2 Sek= 42.177
 lambda=3 Sek= 72.7324

Относительные погрешности длины пути для 2-х методов, %

lambda=0.5 ErrS=1.133
 lambda=1.0 ErrS=1.186
 lambda=1.5 ErrS=1.321
 lambda=2.0 ErrS=1.437
 lambda=3.0 ErrS=1.767

Максимальные относительные погрешности перемещений для 2-х методов, %

lambda=0.5 ErrX=1.838
 lambda=1.0 ErrX=2.046
 lambda=1.5 ErrX=2.309
 lambda=2.0 ErrX=2.593
 lambda=3.0 ErrX=2.424

Таблицы значений перемещений при разных lambda

lambda=0.5		lambda=1		lambda=1.5		lambda=2		lambda=3	
Xem	Xtrut	Xem	Xtrue	Xem	Xtrue	Xem	Xtrue	Xem	Xtrue
1.1181	1.1231	1.1200	1.1253	1.1220	1.1275	1.1239	1.1297	1.1278	1.1341
1.2985	1.3056	1.3208	1.3287	1.3436	1.3523	1.3666	1.3762	1.4139	1.4255
1.5504	1.5757	1.6015	1.6289	1.6541	1.6839	1.7084	1.7408	1.8220	1.8603
1.3685	1.3856	1.4362	1.4549	1.5071	1.5277	1.5814	1.6042	1.7406	1.7687
2.0297	2.0812	2.1621	2.2197	2.3028	2.3675	2.4524	2.5251	2.7803	2.8725
2.3791	2.4274	2.5734	2.6297	2.7831	2.8490	3.0095	3.0865	3.5174	3.6226
2.5139	2.5677	2.7618	2.8255	3.0335	3.1093	3.3314	3.4216	4.0156	4.1434
3.1694	3.2153	3.5352	3.5940	3.9423	4.0172	4.3953	4.4903	5.4602	5.6101
2.7264	2.7674	3.0899	3.1420	3.5009	3.5673	3.9657	4.0502	5.0849	5.2209
2.7549	2.7843	3.1712	3.2109	3.6495	3.7030	4.1989	4.2704	5.5535	5.6795
3.2885	3.3180	3.8438	3.8867	4.4916	4.5529	5.2470	5.3333	7.1538	7.3182
3.1468	3.2095	3.7366	3.8189	4.4355	4.5439	5.2633	5.4065	7.4040	7.6543
2.5294	2.5834	3.0521	3.1222	3.6816	3.7735	4.4392	4.5606	6.4472	6.6616
2.2591	2.3076	2.7696	2.8328	3.3940	3.4777	4.1577	4.2692	6.2317	6.4340
2.4283	2.4737	3.0234	3.0846	3.7629	3.8463	4.6812	4.7962	7.2357	7.4576
1.7822	1.8323	2.2554	2.3207	2.8529	2.9394	3.6071	3.7231	5.7585	5.9727
1.5543	1.6172	1.9986	2.0806	2.5686	2.6767	3.2996	3.4437	5.4368	5.6999
1.5356	1.5907	2.0057	2.0788	2.6183	2.7165	3.4163	3.5500	5.8070	6.0623
1.3859	1.4172	1.8391	1.8812	2.4390	2.4971	3.2329	3.3146	5.6705	5.8400
1.2502	1.2783	1.6854	1.7235	2.2709	2.3237	3.0579	3.1330	5.5351	5.6954

1.1637	1.1835	1.5937	1.6209	2.1814	2.2198	2.9839	3.0400	5.5730	5.7017
1.2735	1.2849	1.7714	1.7874	2.4622	2.4864	3.4202	3.4588	6.5870	6.6931
1.1562	1.1661	1.6339	1.6476	2.3072	2.3281	3.2559	3.2896	6.4708	6.5677
1.2598	1.2644	1.8080	1.8147	2.5928	2.6046	3.7157	3.7382	7.6150	7.7003
1.1854	1.1764	1.7281	1.7151	2.5175	2.5003	3.6648	3.6450	7.7491	7.7466
1.3370	1.3203	1.9795	1.9551	2.9283	2.8951	4.3287	4.2871	9.4372	9.4005
1.0174	0.9957	1.5308	1.4977	2.3015	2.2526	3.4573	3.3882	7.7831	7.6654
1.0293	1.0187	1.5731	1.5564	2.4022	2.3779	3.6652	3.6329	8.5117	8.4798
1.0542	1.0423	1.6365	1.6175	2.5382	2.5102	3.9333	3.8954	9.4216	9.3812
1.0667	1.0554	1.6819	1.6636	2.6496	2.6223	4.1704	4.1335	10.3041	10.2704
0.9937	0.9810	1.5917	1.5706	2.5474	2.5148	4.0729	4.0265	10.3837	10.3222
0.8381	0.8186	1.3640	1.3313	2.2180	2.1652	3.6031	3.5213	9.4816	9.3136

Результати розрахунку довжини траєкторії при різних λ (λ)

$\lambda = 0.5$		$\lambda = 1$		$\lambda = 1.5$		$\lambda = 2$		$\lambda = 3$	
Sem	Strue	Sem	Strue	Sem	Strue	Sem	Strue	Sem	Strue
4.4108	4.5212	4.7185	4.8451	5.0613	5.2022	5.4333	5.6006	6.2915	6.5178
5.0545	5.1858	5.4361	5.5889	5.8610	6.0345	6.3242	6.5318	7.3960	7.6827
5.7230	5.8526	6.1646	6.3181	6.6540	6.8314	7.1866	7.4018	8.4124	8.7173
6.4134	6.5608	6.9376	7.1142	7.5193	7.7261	8.1548	8.4072	9.6229	9.9861
7.1140	7.2612	7.7533	7.9329	8.4681	8.6824	9.2577	9.5239	11.1102	11.5064
7.8231	7.9965	8.5908	8.8041	9.4565	9.7144	10.4233	10.7454	12.7276	13.2156
8.2893	8.4723	9.1244	9.3513	10.0668	10.3432	11.1207	11.4678	13.6357	14.1672
9.3898	9.5802	10.4076	10.6482	11.5627	11.8615	12.8641	13.2455	16.0026	16.6051
10.2759	10.4893	11.4636	11.7359	12.8208	13.1629	14.3814	14.8024	18.2106	18.8915
10.9587	11.1585	12.2736	12.5326	13.7813	14.1114	15.5200	15.9317	19.8083	20.4917
11.8186	12.0149	13.2944	13.5523	14.9922	15.3252	16.9555	17.3762	21.8219	22.5358
12.3123	12.5044	13.9027	14.1577	15.7414	16.0738	17.8778	18.3016	23.2167	23.9489
12.4632	12.6394	14.1137	14.3502	16.0322	16.3435	18.2740	18.6741	23.9324	24.6378
13.1569	13.3397	14.9826	15.2221	17.1201	17.4391	19.6352	20.0507	26.0603	26.8104
13.9147	14.1072	15.9306	16.1850	18.3052	18.6471	21.1158	21.5660	28.3675	29.1934
14.4441	14.6391	16.5904	16.8495	19.1270	19.4769	22.1385	22.6019	29.9471	30.8060
14.8692	15.0841	17.1465	17.4327	19.8537	20.2410	23.0876	23.6028	31.5622	32.5218
15.1596	15.3789	17.5180	17.8108	20.3288	20.7258	23.6946	24.2244	32.5515	33.5433
15.4652	15.6956	17.9208	18.2291	20.8593	21.2783	24.3929	24.9540	33.7588	34.8151
15.5787	15.8211	18.0599	18.3841	21.0287	21.4689	24.5978	25.1870	34.1027	35.1785
15.8383	16.0860	18.4097	18.7419	21.4996	21.9520	25.2314	25.8393	35.2469	36.3667
16.3338	16.5740	19.0723	19.3959	22.3852	22.8283	26.4142	27.0135	37.3537	38.4754
16.4975	16.7432	19.2918	19.6232	22.6796	23.1339	26.8088	27.4244	38.0618	39.2186
16.7326	16.9898	19.6175	19.9591	23.1308	23.5998	27.4336	28.0715	39.2568	40.4662
17.0905	17.3521	20.1113	20.4599	23.8117	24.2923	28.3718	29.0289	41.0672	42.3040
17.2778	17.5392	20.3774	20.7249	24.1895	24.6698	28.9079	29.5663	42.1433	43.3925
17.6045	17.8706	20.8301	21.1850	24.8162	25.3083	29.7741	30.4521	43.7934	45.0954
17.8023	18.0632	21.1291	21.4773	25.2665	25.7502	30.4503	31.1186	45.3036	46.5995
18.0222	18.2819	21.4424	21.7894	25.7124	26.1957	31.0845	31.7542	46.5835	47.8938
18.1307	18.3901	21.6000	21.9444	25.9470	26.4212	31.4330	32.0908	47.3497	48.6416
18.4378	18.7016	22.0551	22.4068	26.6208	27.1075	32.4300	33.1095	49.5271	50.8855
18.5862	18.8521	22.2646	22.6202	26.9157	27.4093	32.8546	33.5351	50.4240	51.7835
18.9258	19.1877	22.7710	23.1214	27.6700	28.1580	33.9775	34.6535	52.9075	54.2803
19.4403	19.6892	23.5467	23.8791	28.8386	29.3025	35.7367	36.3822	56.8837	58.2242
19.6782	19.9263	23.9079	24.2396	29.3866	29.8509	36.5672	37.2161	58.7862	60.1523
19.9543	20.2041	24.3309	24.6658	30.0338	30.5047	37.5566	38.2191	61.0912	62.5115
20.3223	20.5696	24.9025	25.2346	30.9210	31.3897	38.9323	39.5962	64.3905	65.8457
20.5116	20.7638	25.2041	25.5408	31.4013	31.8782	39.6961	40.3756	66.3522	67.8286
20.7330	20.9787	25.5526	25.8764	31.9530	32.4071	40.5799	41.2151	68.6136	69.9992
20.8697	21.1135	25.7694	26.0905	32.2963	32.7472	41.1228	41.7550	69.9652	71.3572
20.9824	21.2294	25.9435	26.2652	32.5647	33.0172	41.5349	42.1716	70.9256	72.3411
21.1318	21.3740	26.1860	26.5002	32.9578	33.3990	42.1770	42.7917	72.7324	74.0410

Б.2 Моделювання групової поведінки 5 дронів за визначеними координатами заданої траєкторії (MATLAB)

Програмний код застосунку для моделювання у середовищі MATLAB групової поведінки 5 дронів. Рух дрону моделюється за визначеними координатами, зчитаними з польотної карти (рис. Б.2).

```

Current possssss: 89, 263
Current possssss: 94, 255
Current possssss: 100, 249
Current possssss: 105, 241
Current possssss: 113, 236
Current possssss: 121, 225
Current possssss: 127, 216
Current possssss: 131, 210
Current possssss: 126, 196
Current possssss: 122, 181
Current possssss: 115, 166
Current possssss: 111, 153
Current possssss: 111, 147
Current possssss: 113, 137
Current possssss: 120, 121
Current possssss: 126, 103
Current possssss: 135, 87
Current possssss: 135, 86
Current possssss: 147, 72
Current possssss: 161, 59
Current possssss: 260, 52
Current possssss: 298, 38
Current possssss: 332, 48
Current possssss: 366, 67
Current possssss: 377, 79
Current possssss: 379, 93
Current possssss: 379, 102
Current possssss: 377, 108
Current possssss: 370, 113

```

Рисунок Б.2 – Приклад роботи програми зчитування точок маршруту з польотної карти

```

clear all;

scale=1;

drone1X=scale*[23 38 54 68 82 92 104 114 ...
drone1Y=scale*[626 617 604 592 580 565 ...
drone1RespX = scale*0;
drone1RespY = scale*0;
drone1RespZ = scale*0;
drone1StartCharge = 60;

drone2X=scale*[ 525 517 513 506 500 491 480 ...
drone2Y=scale*[ 506 495 482 468 453 436 421 ...
drone2RespX = scale*0;
drone2RespY = scale*100;
drone2RespZ = scale*0;
drone2StartCharge = 45;

drone3X=scale*[ 514 510 500 490 485 481 470 ...
drone3Y=scale*[ 486 490 495 499 504 504 499 ...
drone3RespX = scale*0;
drone3RespY = scale*200;

```

```
drone3RespZ = scale*0;
drone3StartCharge = 35;
```

```
drone4X=scale*[ 177 184 191 198 205 204 207...
drone4Y=scale*[ 467 469 472 479 489 481 472 464 ...
drone4RespX = scale*100;
drone4RespY = scale*0;
drone4RespZ =scale* 0;
drone4StartCharge = 25;
```

```
drone5X=scale*[ 485 477 473 465 459 450 439 434...
drone5Y=scale*[ 503 508 514 520 520 511 499 477 ...
drone5RespX = scale*200;
drone5RespY = scale*0;
drone5RespZ = scale*0;
drone5StartCharge = 50;
```

```
lineStyleToResp='-b';
lineStyleUsual='-b';
```

```
drone1Color='y';
drone2Color='r';
drone3Color='g';
drone4Color='k';
drone5Color='m';
pointStyle1=strcat('*', drone1Color);
pointStyle2=strcat('*', drone2Color);
pointStyle3=strcat('*', drone3Color);
pointStyle4=strcat('*', drone4Color);
pointStyle5=strcat('*', drone5Color);
```

```
pointStyleWhite='ok';
sleepTime=0;
j = 0;
```

```
normalZ = 500;
startCharge = 100;
xResp1 = 0;
yResp1 = 0;
zResp1 = 0;
```

```
[toDrawX1,toDrawY1,toDrawZ1] =
calculateCoords(drone1X,drone1Y,drone1RespX,drone1RespY,drone1RespZ,drone1StartCharge,no
rma1Z,scale);
[toDrawX2,toDrawY2,toDrawZ2] =
calculateCoords(drone2X,drone2Y,drone2RespX,drone2RespY,drone2RespZ,drone2StartCharge,no
rma1Z,scale);
[toDrawX3,toDrawY3,toDrawZ3] =
calculateCoords(drone3X,drone3Y,drone3RespX,drone3RespY,drone3RespZ,drone3StartCharge,no
rma1Z,scale);
[toDrawX4,toDrawY4,toDrawZ4] =
```

```

calculateCoords(drone4X,drone4Y,drone4RespX,drone4RespY,drone4RespZ,drone4StartCharge,no
rma1Z,scale);
[toDrawX5,toDrawY5,toDrawZ5] =
calculateCoords(drone5X,drone5Y,drone5RespX,drone5RespY,drone5RespZ,drone5StartCharge,no
rma1Z,scale);
maxLength =
getMax(length(toDrawX1),length(toDrawX2),length(toDrawX3),length(toDrawX4),length(toDraw
X5));

for i=1:maxLength-1
    plot3(0, 800, 1000, '.b');
    hPlotData = plot3(0, 800, 0, '.b');
    %отрисовка респанов
    plot3(drone1RespX, drone1RespY, drone1RespZ, strcat('o', drone1Color));
    plot3(drone2RespX, drone2RespY, drone2RespZ, strcat('o', drone2Color));
    plot3(drone3RespX, drone3RespY, drone3RespZ, strcat('o', drone3Color));
    plot3(drone4RespX, drone4RespY, drone4RespZ, strcat('o', drone4Color));
    plot3(drone5RespX, drone5RespY, drone5RespZ, strcat('o', drone5Color));
    %отрисовка начальных точек
    plot3(toDrawX1(1), toDrawY1(1), toDrawZ1(1), strcat('x', drone1Color));
    plot3(toDrawX2(1), toDrawY2(1), toDrawZ2(1), strcat('x', drone2Color));
    plot3(toDrawX3(1), toDrawY3(1), toDrawZ3(1), strcat('x', drone3Color));
    plot3(toDrawX4(1), toDrawY4(1), toDrawZ4(1), strcat('x', drone4Color));
    plot3(toDrawX5(1), toDrawY5(1), toDrawZ5(1), strcat('x', drone5Color));
    %отрисовка траекторий
    if(i<=length(toDrawX1))
        if(toDrawZ1(i) < normalZ)
            plot3(toDrawX1(1:i), toDrawY1(1:i), toDrawZ1(1:i),LineStyleToResp);
        else
            plot3(toDrawX1(1:i), toDrawY1(1:i), toDrawZ1(1:i),LineStyleUsual);
        end
        hPlotData1 = plot3(toDrawX1(i), toDrawY1(i), toDrawZ1(i), pointStyle1);
    else
        plot3(drone1RespX, drone1RespY, drone1RespZ, pointStyle1);
    end

    if(i<=length(toDrawX2))
        if(toDrawZ2(i) < normalZ)
            plot3(toDrawX2(1:i), toDrawY2(1:i), toDrawZ2(1:i),LineStyleToResp);
        else
            plot3(toDrawX2(1:i), toDrawY2(1:i), toDrawZ2(1:i),LineStyleUsual);
        end
        hPlotData2 = plot3(toDrawX2(i), toDrawY2(i), toDrawZ2(i), pointStyle2);
    else
        plot3(drone2RespX, drone2RespY, drone2RespZ, pointStyle2);
    end

    if(i<=length(toDrawX3))
        if(toDrawZ3(i) < normalZ)
            plot3(toDrawX3(1:i), toDrawY3(1:i), toDrawZ3(1:i),LineStyleToResp);
        else
            plot3(toDrawX3(1:i), toDrawY3(1:i), toDrawZ3(1:i),LineStyleUsual);
        end
    end

```

```

        hPlotData3 = plot3(toDrawX3(i), toDrawY3(i), toDrawZ3(i), pointStyle3);
    else
        plot3(drone3RespX, drone3RespY, drone3RespZ, pointStyle3);
    end

    if(i<=length(toDrawX4))
        if(toDrawZ4(i) < normalZ)
            plot3(toDrawX4(1:i), toDrawY4(1:i), toDrawZ4(1:i),LineStyleToResp);
        else
            plot3(toDrawX4(1:i), toDrawY4(1:i), toDrawZ4(1:i),LineStyleUsual);
        end
        hPlotData4 = plot3(toDrawX4(i), toDrawY4(i), toDrawZ4(i), pointStyle4);
    else
        plot3(drone4RespX, drone4RespY, drone4RespZ, pointStyle4);
    end

    if(i<=length(toDrawX5))
        if(toDrawZ5(i) < normalZ)
            plot3(toDrawX5(1:i), toDrawY5(1:i), toDrawZ5(1:i),LineStyleToResp);
        else
            plot3(toDrawX5(1:i), toDrawY5(1:i), toDrawZ5(1:i),LineStyleUsual);
        end
        hPlotData5 = plot3(toDrawX5(i), toDrawY5(i), toDrawZ5(i), pointStyle5);
    end

    hold on;
    grid;
    F(i) = getframe;
    pause(sleepTime);
    delete(hPlotData1);
    delete(hPlotData2);
    delete(hPlotData3);
    delete(hPlotData4);
    delete(hPlotData5);
end
grid;

% функция вычисления координат
function [drawnX,drawnY,drawnZ] =
calculateCoords(coordsX,coordsY,xResp,yResp,zResp,startCharge,normalZ,scale)
    charge = startCharge;
    drawnX = [];
    drawnY = [];
    drawnZ = [];
    for i = 3:length(coordsX)-1
        x1=coordsX(i);
        y1=coordsY(i);
        x2=coordsX(i+1);
        y2=coordsY(i+1);
        z1=normalZ;
        z2=normalZ;

        if(charge <= 0)

```

```

        charge = startCharge;
        [corX, corY, corZ] = goToRespawnАндБак(x1,y1,normalZ,xResp,yResp,zResp);
        for j=1:length(corX)
            drawnX(length(drawnX)+1) = corX(j);
            drawnY(length(drawnY)+1) = corY(j);
            drawnZ(length(drawnZ)+1) = corZ(j);
        end
    end

    [corX, corY, corZ] = getCoordsBetween(x1,y1,x2,y1,normalZ,scale);
    charge = charge - length(corX);
    for j=1:length(corX)
        drawnX(length(drawnX)+1) = corX(j);
        drawnY(length(drawnY)+1) = corY(j);
        drawnZ(length(drawnZ)+1) = corZ(j);
    end
end
[corX, corY, corZ] =
goToRespawn(coordsX(length(coordsX)),coordsY(length(coordsX)),normalZ,xResp,yResp,zResp);
for j=1:length(corX)
    drawnX(length(drawnX)+1) = corX(j);
    drawnY(length(drawnY)+1) = corY(j);
    drawnZ(length(drawnZ)+1) = corZ(j);
end
return
%функция для вычисления координат между респауном и точкой
function [coordsX,coordsY,coordsZ] = goToRespawnАндБак(x1,y1,z1,x2,y2,z2)
    len = 0;
    len0=20;
    Si = sqrt((x2-x1)*(x2-x1)+(y2-y1)*(y2-y1)+(z2-z1)*(z2-z1));
    coordsX=[x1 x1];
    coordsY=[y1 y1];
    coordsZ=[z1 z1];
    while len < Si
        xi = x1+len*(x2-x1)/Si;
        yi = y1+len*(y2-y1)/Si;
        zi = z1+len*(z2-z1)/Si;
        len = len+len0;

        coordsX(length(coordsX)+1) = xi;
        coordsY(length(coordsY)+1) = yi;
        coordsZ(length(coordsZ)+1) = zi;
    end
    len=0;
    while len < Si
        xi = x2+len*(x1-x2)/Si;
        yi = y2+len*(y1-y2)/Si;
        zi = z2+len*(z1-z2)/Si;
        len = len+len0;
        coordsX(length(coordsX)+1) = xi;
        coordsY(length(coordsY)+1) = yi;
        coordsZ(length(coordsZ)+1) = zi;
    end
end
return

```


Додаток В
Акти впровадження результатів роботи

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи ЖУРАВСЬКОЇ Ірини Миколаївни на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

« 07 » _____ 09 _____ 201 8 р.

м. Одеса

Незважаючи на зростаючу комп'ютеризацію водних транспортних засобів, наразі процес обліку завантаження/розвантаження суден-контейнеровозів є недостатньо автоматизованим. При такому порядку інформованість капітана судна щодо кількості розвантажених/завантажених контейнерів у кожній секції контейнеровозу є обмеженою і потребує підключення до проприетарних комп'ютерних систем (КС) компаній-власників контейнерів.

Метод реєстрації контейнерів, що перенесені через борт судна портокраном, з використанням мобільних пристроїв, які розміщуються за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА або квадрокоптерів) на даху контейнерів, про який зазначається в дисертаційній роботі Журавської І. М., представляє значний інтерес для організації поточної роботи на контейнеровозі. Через значні переваги вказаного методу над аналогами він буде конкурентоспроможним на ринку КС з обліку рухомих вантажів.

Зокрема, інтерес представляє впровадження у поточну роботу із вивантаження/завантаження контейнерів з/на судно таких результатів, отриманих Журавською І. М.:

- структурних та схемотехнічних рішень з обліку морських контейнерів, що перенесені через борт судна портокраном, з використанням гетерогенної рухомої моніторингової мережі, хостами якої є мобільні пристрої, що розносяться на дахи контейнерів за допомогою БПЛА;
- метод реєстрації рухомих вантажів на основі конкатенації функцій датчика освітленості та фотокамери мобільних пристроїв.

Результати дисертаційного дослідження Журавської І. М. є перспективними для впровадження у вигляді КС обліку кількості завантажених/вивантажених контейнерів, коли не потрібне урахування розподілу ваги контейнерів по судну. Практична цінність запропонованого рішення полягає в тому, що утворена бездротова комп'ютерна мережа є локальною, підпорядковується капітану судна, призначена для інформування екіпажу і не потребує підключення до зовнішніх каналів зв'язку та КС власників контейнерів. Необхідна кількість обладнання та терміни реалізації будуть визначені після завершення технічних та маркетингових досліджень.

Капітан контейнеровозу
"CSCL Uranus"



Ю. О. Накул

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора департаменту
житлово-комунального господарства
Миколаївської міської ради –
начальник управління житлового
господарства



[Handwritten signature]

О. В. Репін

2019 р.

АКТ

**впровадження результатів дисертаційної роботи
ЖУРАВСЬКОЇ Ірини Миколаївни
«Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування
швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування»
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук**

Даний Акт складений у тому, що результати дисертаційної роботи ЖУРАВСЬКОЇ Ірини Миколаївни «Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування» впроваджені у діяльність Департаменту ЖКГ ММР, зокрема:

- метод пошуку тепловитоків в інженерних комунікаціях на основі дослідження теплових карт за допомогою рухомих пристроїв, поєднаних у швидкодинамічну комп'ютерну мережу;
- структура протоколу передавання даних з рухомих інструментальних засобів вимірювання температури до розробленої системи моніторингу з подовженим часом функціонування гетерогенної комп'ютерної мережі.

Використання перерахованих вище результатів дисертаційної роботи для пошуку тимчасового порушення ізоляції та проривів теплотрас протягом опалювального сезону 2018/2019 рр. дозволило зменшити час пошуку аварій на 21,4 %, й тим самим прискорити ремонт теплотрас.

Заступник начальника управління житлового господарства – начальник відділу з експлуатації житлового господарства департаменту житлово-комунального господарства Миколаївської міської ради

[Handwritten signature]

О. М. Гапчук

ЗАТВЕРДЖУЮ



Ректор Чорноморського національного
університету ім. Петра Могили, проф.

Л. П. Кліменко

21 травня 2019 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Журавської І. М. на тему: «Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування» в навчальний процес Чорноморського національного університету ім. Петра Могили на кафедрі комп'ютерної інженерії

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи Журавської І. М. застосовуються у навчальному процесі на кафедрі комп'ютерної інженерії ЧНУ ім. Петра Могили в курсі лекційних, практичних та лабораторних занять при викладанні дисциплін «Комп'ютерні мережі» (студентам 4-го та 5-го курсів спеціальності 123 – комп'ютерна інженерія) та «Кібербезпека» (студентам 4-го курсу спеціальності 123 – комп'ютерна інженерія).

До програми дисципліни «Кібербезпека» введені такі теми, які містять матеріал роботи здобувача:

- «Впровадження безпечних механізмів обміну даними через хмарні сервіси»;
- «Використання геш-функцій для підвищення криптостійкості методів шифрування інформації»;

- «Організація захисту конфіденційних даних, що передаються відкритими каналами зв'язку, за рахунок стеганографічного закриття інформації».

До програми дисципліни «Комп'ютерні мережі» введені такі теми, які містять матеріал роботи здобувача:

- «Топологія гетерогенних рухомих комп'ютерних мереж»;
- «Подовження часу функціонування бездротових мереж за рахунок передачі енергії між об'єктами мережі за технологією PoWiFi»;

- «Запобігання падінню швидкості передачі інформації в гетерогенній мережі через перешкоди за рахунок зменшення асиметрії каналу зв'язку»;

- «Організація віддаленого відключення електроживлення хостів бездротових мереж».

Лекційні матеріали та методичні матеріали для виконання лабораторних та практичних робіт наведені в надрукованому навчальному посібнику:

Журавська І. М. *Проектування та монтаж локальних комп'ютерних мереж: навч. посібник. Миколаїв: Видавництво ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. 396 с.*

Декан факультету комп'ютерних наук,
канд. техн. наук, доцент

А. П. Бойко

Зав. каф. комп'ютерної інженерії,
канд. фіз.-мат. наук, доцент

О. В. Дворник

ЗАТВЕРДЖУЮ



Л. П. Кліменко

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Журавської І. М. на тему: «Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування» при виконанні держбюджетної НДР

«Розроблення мобільних малогабаритних та стаціонарних бездротових приладів ранньої діагностики, профілактики, лікування та посттравматичних відновлень військово-цивільного застосування» (№ держ. реєстрації 0119U100422; керівник НДР д-р техн. наук, проф. Трунов О. М., термін виконання роботи 01.01.2019–31.12.2020)

Держбюджетна НДР «Розроблення мобільних малогабаритних та стаціонарних бездротових приладів ранньої діагностики, профілактики, лікування та посттравматичних відновлень військово-цивільного застосування» виконується в Чорноморському національному університеті ім. Петра Могили.

При виконанні 1-го етапу НДР були використані розроблені здобувачем Журавською І. М. методи та алгоритми взаємодії об'єктів рухомої моніторингової мережі. Впроваджені рішення щодо забезпечення конфіденційності діагностичних даних, які отримані віддаленим шляхом, за рахунок реалізації стеганографічного закриття GPS-координат досліджуваного об'єкта у відкриті дані, які передаються за допомогою протоколу MAVLink відкритими каналами зв'язку. Це дозволяє при перехопленні трафіку скрити у переданій інформації дані щодо місцеположення об'єкта, до якого застосовуються методи ранньої діагностики, профілактики, лікування та посттравматичних відновлень.

За результатами розробок отримано *патент України на корисну модель № 132326, опубл. 25.02.2019, Бюл. № 4*, а також опубліковано монографію:

Журавська І. М. Гетерогенні комп'ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БПЛА. Миколаїв : Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили, 2019. 192 с. ISBN 978-966-336-402-5.

Канд. техн. наук, доц. Журавська І. М. приймає участь у НДР як відповідальний виконавець.

Керівник НДР,
зав. каф. автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій,
д-р техн. наук, проф.

О. М. Трунов

«16» 05 2019 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ



Ректор Чорноморського
національного університету
ім. Петра Могили

Л. П. Кліменко

2018 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Журавської І. М. на тему: «Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування» при виконанні держбюджетної НДР

«РОЗРОБЛЕННЯ БЕЗДРОТОВИХ ЕНЕРГОНЕЗАЛЕЖНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ВІЙСЬКОВО-ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ» (№ держ. реєстрації 0117U000447;

керівник НДР д-р техн. наук, проф. Мусієнко М. П., 01.01.2017–31.12.2018)

Держбюджетна НДР «РОЗРОБЛЕННЯ БЕЗДРОТОВИХ ЕНЕРГОНЕЗАЛЕЖНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ВІЙСЬКОВО-ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ» виконується в Чорноморському національному університеті ім. Петра Могили.

При виконанні НДР були використані та включені до заключного звіту з НДР розроблені здобувачем Журавською І. М. методи та засоби керування групою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) із запобіганням зіткнень. Впроваджені рішення щодо забезпечення вирішення задач планування маршруту групи БПЛА, визначення способу моніторингу цілі, моделювання поведінки суб-роїв безпілотних апаратів у просторових коридорах.

За рахунок використання нейронної мережі Хопфілда у поєднанні з картою польоту групи БПЛА виконаний синтез маршрутів суб-роїв БПЛА у просторових коридорах на місцевості. Це дозволило реалізувати механізм «самозагоєння» у межах групи («зграї») БПЛА та перевизначати завдання підгруп («суб-роїв») БПЛА у разі втрати кількох апаратів під час критичного застосування, а також дозволило уникнути дублювання виконання завдань у будь-яких точках території.

За результатами розробок подані 2 заявки на патент України на винахід № а201806466 та № а201806478 (публ. відомостей про заявки 25.09.2018, Бюл. № 18), а також опубліковано 10 наукових статей (з них 2 індексовано у базі Scopus, 1 – у базі Web-of-Science).

Канд. техн. наук, доц. Журавська І. М. приймала участь у НДР як відповідальний виконавець.

Керівник НДР,
професор каф. комп'ютерної інженерії,
д-р техн. наук, проф.

«27» 12

2018 р.



М. П. Мусієнко

ЗАТВЕРДЖУЮ



Ректор Чорноморського
національного університету
ім. Петра Могили

Л. П. Кліменко

«16» березня 2017 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Журавської І. М. на тему: «Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування» при виконанні держбюджетної НДР

«Розроблення поліметричних датчиків інформаційно-вимірювальних систем з живленням елементів від вимірювального сигналу» (№ держ. реєстрації 0115U000316; керівник НДР д-р техн. наук, проф. Мусієнко М. П., термін виконання роботи 01.01.2015–31.12.2016)

Держбюджетна НДР «Розроблення поліметричних датчиків інформаційно-вимірювальних систем з живленням елементів від вимірювального сигналу» виконувалась у Чорноморському національному університеті ім. Петра Могили.

При виконанні НДР був використаний розроблений здобувачем Журавською І. М. бездротовий метод керування енергоспоживанням модулів інформаційно-вимірювальних систем за рахунок віддаленого відключення неперіоритетних пристроїв та/або ушкоджених функційних модулів, що дозволяє зекономити до 11,2% енергії батареї БПЛА. Також були впроваджені модифікований алгоритм передачі енергії та часова діаграма (циклограма) передачі енергії через WiFi-канали, які не перетинаються. Це дозволяє віддалено передавати накопичену на кібер-фізичних об'єктах енергію для електроживлення інших об'єктів бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж та продовжувати цим час життя кібер-фізичної системи.

За результатами розробок опубліковано 7 наукових статей (з них 2 індексовано у базі Scopus), 1 навчальний посібник.

Канд. техн. наук, доц. Журавська І. М. приймала участь у НДР як виконавець.

Керівник НДР,
проф. каф. комп'ютерної інженерії,
д-р техн. наук, проф.

М. П. Мусієнко

«16» 03 2017 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ



Ректор Чорноморського
національного університету
ім. Петра Могили

Л. П. Кліменко

2019 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Журавської І. М. на тему: «Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування» при виконанні держбюджетної НДР

«Розроблення найсучаснішого інтерактивного навчально-тренажерного та аналітично-консультативного комплексу військово-цивільного призначення» (№ держ. реєстрації 0118U000193; керівник НДР д-р техн. наук, проф. Фісун М. Т., термін виконання роботи 01.01.2018–31.12.2019)

Держбюджетна НДР «Розроблення найсучаснішого інтерактивного навчально-тренажерного та аналітично-консультативного комплексу військово-цивільного призначення» виконується в Чорноморському національному університеті ім. Петра Могили. При виконанні НДР з 01.01.2018 по 31.12.2018, а також при підготовці проміжного анотованого звіту за 1-й етап виконання НДР були використані наукові та практичні результати, отримані та опубліковані у таких наукових та технічних роботах канд. техн. наук, доц. Журавської І. М.:

Монографії:

1. Zhuravska I., Musiyenko M. Heterogeneous computer networks of critical application: Creation and functioning of networks based on UAVs' swarms and flocks : monograph. LAMBERT Academic Publishing, 2018. 367 p. ISBN 978-613-9-86357-0. URL: https://www.amazon.com/Heterogeneous-computer-networks-critical-application/dp/6139863570/ref=sr_1_1?s=books&ie=UTF8&qid=1534885786&sr=1-1&keywords=zhuravska.

Наукові публікації:

2. Zhuravska I., Kulakovska I., Musiyenko M. Development of a method for determining the area of operation of unmanned vehicles formation by using the graph theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2, No. 3 (92). P. 4–12. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.128745. *Scopus, Index Copernicus*.

3. Журавська І. М. IoT-мережа на базі Bluetooth-модулів для автоматизованого керування споживанням енергоресурсів. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво* / Луцьк. нац. техн. ун-т. 2018. Вип. 30–31. С. 37–44. *Index Copernicus*.

4. Журавська І. М. Бездротовий метод керування відключенням пристроїв на борту БПЛА з обмеженими енергоресурсами. *Електротехнічні та комп'ютерні системи* / Одес. нац. політехн. ун-т. 2018. № 27 (103). С. 205–212. DOI: 10.15276/eltecs.27.103.2018.23.

5. Журавська І. М. Генерація суб-оптимальних маршрутів безпілотного літального апарата з використанням нейронної мережі Хонфілда. *Проблеми інформаційних технологій* : наук.-метод. журн. / Херсон. нац. техн. ун-т. 2018. Вип. 01 (023). С. 181–185.

Патенти:

6. Пат. на корисну модель 130608 Україна, МПК (2006.01) B64C 39/02. Малогабаритна безпілотна авіаційна система повітряного спостереження з наземної станції контролю та управління / Д. І. Румянков, М. П. Мусієнко, І. М. Журавська, В. В. Олійник. № у 2018 08713 ; заявл. 14.08.2018 ; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23.

7. Пат. на корисну модель 130607 Україна, МПК (2006.01) B64C 29/00. Спосіб формування підйомної сили безпілотних літальних апаратів з можливістю осьового розвороту корпусу апаратів, що виконують процедуру підйому і переміщення предметів / І. М. Журавська. № у 2018 08712 ; заявл. 14.08.2018 ; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23.

8. Пат. на корисну модель 130195 Україна, МПК (2006.01) B64C 29/04. Спосіб формування підйомної сили спарених безпілотних літальних апаратів для підйому і переміщення предметів / І. М. Журавська. № у 2018 06480 ; заявл. 11.06.2018 ; опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22.

Матеріали конференцій:

9. Burlachenko I., Zhuravska I., Davydenko Ye., Savinov V. Vulnerabilities analysis and defense based on MAS method in fast dynamic wireless networks. *Wireless Systems within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IEEE IDAACS-SWS 2018)* : Proceeding of the 4th IEEE International Symposium, Lviv, Ukraine, September 20–21, 2018. P. 98–102. ISBN 978-1-5386-7587-8. DOI: 10.1109/IDAACS-SWS.2018.8525692. *Scopus*.

10. Білий О. Р., Гапчук А. О., Журавська І. М. Побудування теплових карт для виявлення теплових втрат житлових та промислових споруд. *Free and Open Source Software (FOSS 2018)* : тези доп. X Міжнар. наук.-практ. конф. / Харків. нац. ун-т будівництва та архітектури, Харків, 20-22 листопада 2018 р. Харків : Вид во ХНУБА, 2018. С. 59.

11. Журавська І. М., Кулаковська І. В. Метод визначення площі функціонування групи безпілотних апаратів з використанням GPS-координат. *Ольвійський форум – 2018 : стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі* : тези XII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Миколаїв, 7-10 червня 2018 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид во ЧНУ ім. Петра Могили, 2018. С. 60–62.

Канд. техн. наук, доц. Журавська І. М. приймала участь у НДР як виконавець.

Керівник НДР,
зав. каф. інженерії програмного забезпечення,
д-р техн. наук, проф.

 М. Т. Фісун

«15» січня 2019 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

«Схід-Захід-Енерго»

А. І. Мамонтов

2017 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

ЖУРАВСЬКОЇ Ірини Миколаївни

«Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування»

на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Даним Актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Журавської І. М. використовуються для організації внутрішньокорпоративного обміну повідомленнями між співробітниками підрозділів підприємства засобами гетерогенних бездротових мереж, зокрема:

– метод запобігання падінню швидкості передачі інформації в гетерогенній мережі через перешкоди від підключення до ефіру нових об'єктів, які не входять до складу користувачів корпоративної бездротової мережі але знаходяться у радіусі дії останньої;

– метод захисту інформації про місцезнаходження корпоративних об'єктів та співробітників шляхом стеганографічного закриття GPS-координат в окремих числових повідомленнях, при застосуванні якого унеможливується відокремлення стегоконтейнера із загальної інформації.

Завдяки впровадженню результатів дисертаційної роботи в поточну діяльність ТОВ «Схід-Захід-Енерго» протягом 2017–2018 рр. було забезпечене збільшення радіусу мережі зі стабільним зв'язком на 35,7 % за рахунок зменшення асиметрії каналу зв'язку між об'єктами

Також був покращений рівень конфіденційності корпоративної інформації, що передається відкритими каналами зв'язку через Інтернет, за рахунок збільшення на 18 % криптостійкості трафіку даних зі стеганографічним закриттям інформації (при використанні для криптоаналізу обладнання на платформі Windows/Linux з тактовою частотою CPU 2,6–3 ГГц).

Начальник проєктно-конструкторського відділу, технік (сфера захисту інформації)
ТОВ «Схід-Захід-Енерго»

Р. Р. Тарабанов

Додаток Г
Сертифікати участі у Міжнародних програмах



Ministry of Education and Science of Ukraine
 Petro Mohyla Black Sea State University



Tempus

DIPLOMA
 (2014-2016) CABRIOLET

Awarded to

The Project A SOLUTION TO PROTECT YOUR PRIVACY AND YOUR DATA (WiSafe)



— Authors: Yurin Dmytro, Polischuk Denys (Students Undergrads);
 — Coach: Zhuravska Iryna M. (Assoc. Prof., Ph.D.),
 Petro Mohyla Black Sea State University (Mykolayiv, Ukraine),
 for 2-nd place



at the Battle of IT-Startups in Green&Secure ICT Systems (GreenSup)
 September 6-7, 2015, Mykolaiv, Ukraine

This event was organized with the support of the following TEMPUS projects:
 TEMPUS CABRIOLET (544497 – TEMPUS-1-2013-1-UK-TEMPUS-JPHES),
 TEMPUS SEREIN (543968 – TEMPUS-1-2013-1-EE-TEMPUS-JPCR),
 TEMPUS GREENCO (530970 – TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR)



Prof. L. Klymenko

Prof. C. Phillips

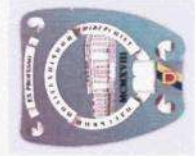
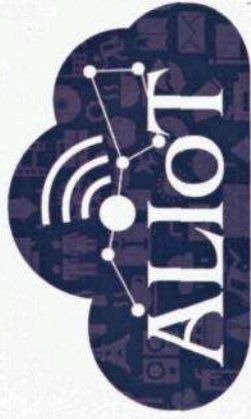
Rector of PMBSU

Director of TEMPUS-projects

(Handwritten signatures)



Funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



CERTIFICATE

is presented to



Iryna Zhuravska

for participation in
International Spring Training School AIST 2017
for students, early-career researchers and lecturers



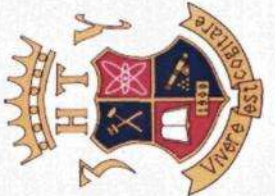
“Internet of Things: Emerging Curriculum for Industry and Human Applications”

co-organized by

Petro Mohyla Black Sea National University
National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky “KhAI”



Course duration: lectures, training and independent studies 20 hours



Mykolaiv, Ukraine, 2017 May 8-12



Chris Phillips

Prof. Chris Phillips
Grantholder of Erasmus+ ALIoT project,
Newcastle University

Університет «Національний аерокосмічний університет імені Іллія Меленко»
Іллія Меленко



University of Chernivtsi

Ministry of Education and Science of Ukraine
National University "Zaporizhzhia Polytechnic"
Institute of Informatics and Radio Electronics
Faculty of Computer Science and Technology
Department of Software Tools

**Second International Workshop on
Computer Modeling and Intelligent Systems
CMIS-2019**



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



The CMIS-2019 International Workshop is supported by the Erasmus+ project "Innovative Multidisciplinary Curriculum in Artificial Implants for Bio-Engineering BSc/MSc Degrees" (BIOART) co-funded by the European Union
Ref. No. 586114-EPP-1-2017-1-ES-EPPKA2-CBHE-JP

Certificate of Reviewer

This is to certify that

Irina Zhuravskaya

took part in the review and evaluation of papers
submitted to the CMIS-2019 Workshop.

Co-chair of the CMIS-2019

Sergey Subbotin, Dr.Sc., Prof.,
Head of the Department of Software Tools
of National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

07 of April 2019

Information about CMIS-2019 Workshop
is provided via
<https://www.fb.com/events/789159874773726/>

Додаток Д

Список праць за темою дисертації та відомості з апробації матеріалів дисертації

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Zhuravska I., Musiyenko M. Heterogeneous computer networks of critical application: Creation and functioning of networks based on UAVs' swarms and flocks : monograph. LAMBERT Academic Publishing, 2018. 367 p. ISBN 978-613-9-86357-0. URL: https://www.amazon.com/Heterogeneous-computer-networks-critical-application/dp/6139863570/ref=sr_1_1?s=books&ie=UTF8&qid=1534885786&sr=1-1&keywords=zhuravska.

2. Журавська І. М. Гетерогенні комп'ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БПЛА. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2019. 192 с. ISBN 978-966-336-402-5.

3. Zhuravska I., Kulakovska I., Musiyenko M. Development of a method for determining the area of operation of unmanned vehicles formation by using the graph theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2, No. 3 (92). P. 4–12. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.128745. **Scopus, Index Copernicus.**

4. Burlachenko I., Zhuravska I., Musiyenko M. Devising a method for the active coordination of video cameras in optical navigation based on multi-agent approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1, No. 9 (85). P. 17–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.90863. **Scopus, Index Copernicus.**

5. 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 – Int. Society for Optics and Photonics*, Wilga, Poland, May 28-June 06, 2017. Vol. 10445. UNSP

1044527. P. 1–13. ISSN 0277-786X. DOI: 10.1117/12.2280965. **Scopus, Web of Science.**

6. Zhuravska I., Lernatovych D., Burenko O. Detection the places of the heat energy leak on the underground thermal pipelines using the computer system. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2019. Vol. 4, No. 3, pp. 01–09. DOI: 10.25046/aj040301. **Scopus.**

7. Журавська І. М., Мусієнко М. П. Синтез маршрутів суб-роїв безпілотних апаратів з використанням нейронної мережі Хопфілда для обстеження територій. *Radio Electronics, Computer Science, Control / Zaporizhzhya National Technical University*. 2017. No. 3. P. 86–94. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-3-10. **Web of Science.**

8. Журавська І. М. IoT-мережа на базі Bluetooth-модулів для автоматизованого керування споживанням енергоресурсів. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво / Луцьк. нац. техн. ун-т*. 2018. Вип. 30–31. С. 37–44. **Index Copernicus.**

9. Zhuravska I., Borovlova S., Kostyria M., Koretska O. Efficiency improvement of using unmanned aerial vehicles by distribution of tasks between the cores of the computing processor. *Technology audit and production reserves*. 2017. Vol. 6, No. 6 (38). P. 4–13. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.117889. **Index Copernicus.**

10. Журавська І. М., Обухова К. О., Лавриненко С. В. Імплементация програмного забезпечення моніторингу та диспетчеризації навантаження ядер однокристального процесора. *Наукові праці : наук. журн. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили*. 2017. Т. 308. Вип. 296. С. 77–82 (Серія : Комп'ютерні технології). **Index Copernicus.**

11. Мусієнко М. П., Журавська І. М. Система контролю безпілотних апаратів, заснована на використанні мобільних пристроїв. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво / Луцьк. нац. техн. ун-т*. 2017. Вип. 26. С. 199–203. **Index Copernicus.**

12. 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). **Index Copernicus.**

13. Журавська І. М. Забезпечення стабільного бездротового зв'язку у кіберфізичній системі з рухомими об'єктами. *Технологічний аудит та резерви виробництва* : наук. журн. Харків : Технологічний центр, 2016. Т. 5, № 5/2(31). С. 58–64. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.80784. **Index Copernicus.**

14. Журавська І. М. Аналіз та вибір WiFi-мережі в умовах нестабільної ефірної ситуації. *Технологічний аудит та резерви виробництва* : наук. журн. Харків : Технологічний центр, 2013. Т. 5, № 5 (13). С. 8–10. DOI: 10.15587/2312-8372.2013.18371. **Index Copernicus.**

15. Журавська І. М. Бездротовий метод керування відключенням пристроїв на борту БПЛА з обмеженими енергоресурсами. *Електротехнічні та комп'ютерні системи* / Одес. нац. політехн. ун-т. 2018. № 27 (103). С. 205–212. DOI: 10.15276/eltecs.27.103.2018.23. **Index Copernicus.**

16. Журавська І. М. Генерація суб-оптимальних маршрутів безпілотного літального апарата з використанням нейронної мережі Хопфілда. *Проблеми інформаційних технологій* : наук.-метод. журн. / Херсон. нац. техн. ун-т. 2018. Вип. 01 (023). С. 181–185.

17. Журавська І. М. Реєстрація великорозмірних вантажів за допомогою автоматизованої системи на базі пристроїв з обмеженими обчислювальними можливостями. *Електротехнічні та комп'ютерні системи* / Одес. нац. політехн. ун-т. 2017. № 26 (102). С. 60–67. DOI: 10.15276/eltecs.26.102.2017.7. **Index Copernicus.**

18. Журавська І. М., Мусієнко М. П. Мобільна система керування гетерогенною рухомою мережею безпілотних апаратів. *Зб. наук. праць Військ. ін-*

ту Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Київ : ВІКНУ, 2017. Вип. № 57. С. 30–40.

19. Журавська І. М., Мусієнко М. П., Кулаковська І. В. Автоматизована система обліку розвантаження суден контейнеровозів з використанням мобільних пристроїв. *Наук. вісник Херсон. держ. мор. акад.* : наук. журн. 2017. Вип. 1 (16). С. 37–46.

20. Журавська І. М., Мусієнко М. П., Румянков Д. І. Блоковий метод шифрування для рухомих об'єктів з обмеженими обчислювальними ресурсами. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія* / Вінниц. нац. політехн. ун-т. 2016. Т. 3, № 37. С. 28–32.

21. Мусієнко М. П., Журавська І. М. Алгоритми прокладання маршруту безпілотних літальних апаратів на основі застосування нейронних мереж Хопфілда. *Вісник Черкаського держ. технол. ун-ту* : зб. наук. праць. 2016. № 1. С. 20–27 (Серія : Технічні науки).

22. Мусієнко М. П., Журавська І. М., Бурлаченко І. С. та ін. Рухомі моніторингові мережі критичного застосування: проблеми створення та напрями розвитку. *Наукові праці* : наук.-метод. журн. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. 2015. Т. 266, Вип. 254. С. 112–118 (Серія : Комп'ютерні технології).

23. Фісун М. Т., Журавська І. М., Горбань Г. В. Інтеграція даних мережевого трафіку мультисервісної корпоративної мережі з класами постріляційної СКБД Caché. *Наукові праці* : наук.-метод. журн. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. 2011. Т. 173, Вип. 161. С. 105–110 (Серія : Комп'ютерні технології).

24. Журавская И. Н., Назарова Н. С. Определение эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции двухобмоточного трансформатора. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий* : сб. науч. тр. / ИИПТ НАН Украины. Николаев ; отв. ред. В. С. Крутиков. Николаев : Атолл, 2002. Вып. 4. С. 115–122.

25. Мирошниченко Л. Н., Пусев А. Н., Журавская И. Н. Эффективное управление многоячеечными зарядными устройствами на базе одноктактных транзисторных инверторов. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий* : сб. науч. тр. / Отв. ред. В. В. Шамко. Киев : Наук. думка, 1995. Вып. 2. С. 107–110. ISSN 0132-1811.

26. Пат. на корисну модель 130608 Україна, МПК (2006.01) В64С 39/02. Малогабаритна безпілотна авіаційна система повітряного спостереження з наземної станції контролю та управління / Д. І. Румянков, М. П. Мусієнко, І. М. Журавська, В. В. Олійник. № u 2018 08713 ; заявл. 14.08.2018 ; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23.

27. Пат. на корисну модель 130607 Україна, МПК (2018.01) В64С 29/00. Спосіб формування підйомної сили безпілотних літальних апаратів з можливістю осьового розвороту корпусу апаратів, що виконують процедуру підйому і переміщення предметів / І. М. Журавська. № u 2018 08712 ; заявл. 14.08.2018 ; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23.

28. Пат. на корисну модель 130195 Україна, МПК (2006.01) В64С 29/04. Спосіб формування підйомної сили спарених безпілотних літальних апаратів для підйому і переміщення предметів / І. М. Журавська. № u201806480 ; заявл. 11.06.2018 ; опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

29. Zhuravska I., Musiyenko M., Tohoiev O. Development the heat leak detection method for hidden thermal objects by means the information-measuring computer system. *CEUR Workshop Proceedings* : Proceedings of the 2nd International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS–2019), Zaporizhzhia, Ukraine, April 15–19, 2019 [eds.: D. Luengo, S. Subbotin, P. Arras, et al.], Vol. 2353. P. 350–364. ISSN 1613-0073. **Scopus**.

30. Burlachenko I., Zhuravska I., Davydenko Ye., Savinov V. Vulnerabilities analysis and defense based on MAS method in fast dynamic wireless networks. *Wireless Systems within the IEEE Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and*

Advanced Computing Systems (IEEE IDAACS-SWS 2018) : Proceeding of the 4th IEEE Int. Symposium, Lviv, Ukraine, September 20–21, 2018. P. 98–102. ISBN 978-1-5386-7587-8. DOI: 10.1109/IDAACS-SWS.2018.8525692. **Scopus**.

31. Rumiankov D., Zhuravska I., Solobuto L., Musiyenko M. Reduction of noise similar to solar interference in computer networks based on Power Line Communication. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2017)* : Proceeding of the 8th IEEE Int. Conf., Bucharest, Romania, September 21–23, 2017. Vol. 1. P. 215–221. ISBN 978-1-5386-0697-1/17. DOI: 10.1109/IDAACS.2017.8095079. **Scopus, Web of Science**.

32. Musiyenko M. P., Burlachenko I. S., Denysov O. O., Zhuravska I. M. Development of double median filter for optical navigation problems. *Data Stream Mining & Processing (DSMP–2016)* . Proceeding of the IEEE 1st Int. Scientific and Technical Conf., Lviv (vil. Stare Selo), August 23–27, 2016 / Lviv Polytechnic National University. P. 177–181. ISBN 978-1-5090-3737-7, 978-1-5090-3736-0. DOI: 10.1109/DSMP.2016.7583535. **Scopus, Web of Science**.

33. Musiyenko M. P., Zhuravska I. M., Kulakovska I. V., Kulakovska A. V. Simulation the behavior of robot sub-swarm in spatial corridors. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO–2016)* : Proceeding of the 2016 IEEE 36th Int. Conf., Kyiv, Ukraine, April 19–21, 2016 / National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. P. 382–387. ISBN 978-1-5090-1431-6. DOI: 10.1109/ELNANO.2016.7493090. **Scopus, Web of Science**.

34. Zhuravska I. M., Popel M. I. Automation of pharmaceutical warehouse using groups robots with remote climate control and video surveillance. *Science and Innovation in the XXI century* : Collection of Conf. Papers of Int. Scientific-Practical Conf., London, the United Kingdom, December 11–12, 2014. P. 30–32. DOI: 10.5281/zenodo.14090. **Zenodo-CERN Data Centre**.

35. Zhuravska I. M., Lavrynenko S. V. Implementation the monitoring CPU loading application for mobile devices. *Information technology and*

interactions (IT&T-2017) : Proceedings of the 4th Int. Scientific Conf.. Kyiv, Ukraine, November 8–10, 2017 / Taras Shevchenko National University of Kyiv. P. 112–113.

36. Kulakovska I. V., Zhuravska I. M. Mathematical modeling container network via a connected graph. *11th Int. Algebraic Conf. in Ukraine dedicated to the 75th anniversary of V. V. Kirichenko* : Abstracts, Kyiv, Ukraine, July 3–7, 2017 / Taras Shevchenko National University of Kyiv. P. 68. Also available from URL: <https://www.imath.kiev.ua/~algebra/iacu2017/abstracts> (Last accessed October 31, 2017).

37. Zhuravska I. M., Lematovych D. O. Fuzzy modeling system of human behavior and biometric identification using cloud services. *Applied Sciences in Europe: Tendencies of Contemporary Development* : Papers of the 5th Int. Scientific Conf., Stuttgart, Germany, March 24, 2014. P. 30–32. ISBN 978-3-944375-34-2.

38. Білий О. Р., Гапчук А. О., Журавська І. М. Побудування теплових карт для виявлення теплових втрат житлових та промислових споруд. *Free and Open Source Software (FOSS-2018)* : тези доп. X Міжнар. наук.-практ. конф. / Харків. нац. ун-т будівництва та архітектури, Харків, 20–22 листопада 2018 р. Харків : Вид во ХНУБА, 2018. С. 59.

39. Журавська І. М., Кулаковська І. В. Метод визначення площі функціонування групи безпілотних апаратів з використанням GPS-координат. *Ольвійський форум – 2018* : тези XII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Миколаїв, 7-10 червня 2018 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2018. С. 60–62.

40. Журавська І. М., Мусієнко М. П. Мобільний реєстратор завантаження/розвантаження великорозмірних об'єктів військово-цивільного призначення. *Військова освіта і наука: сьогоднішня та майбутня* : тези доп. XIII Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 24 листопада 2017 р. / Військ. ін-т Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Київ : ВІКНУ, 2017. С. 37–38.

41. Журавська І. М., Лавриненко С. В., Обухова К. О. Моніторинг навантаження обчислювальних систем БПЛА. *Free and Open Source Software* :

тези доп. IX Міжнар. наук.-практ. конф./ Харків. нац. ун-т будівництва та архітектури, Харків, 21–23 листопада 2017 р. Харків : Вид во ХНУБА, 2018. С. 72.

42. Боровльова С. Ю., Журавська І. М., Костиря М. А. Бенчмаркінг ефективності організації ітераційних процесів у багатоядерному процесорі. *Могілянські читання-2017. Секція «АСУ, CASE-засоби та програмна інженерія»* : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13-17 листопада 2017 р. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2017. С. 57–60.

43. Довгенко О. Є., Журавська І. М. Моделі та методи розробки інформаційно-вимірювальних систем моніторингу температурного режиму побутових споруд. *Могілянські читання-2017* : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13-17 листопада 2017 р. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2017. С. 31–32.

44. Єлезаров В. О., Журавська І. М. Технологія Інтернету речей для забезпечення почергового підключення побутової техніки до електромережі. *Могілянські читання-2017* : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13–17 листопада 2017 р. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2017. С. 32–34.

45. Журавська І. М., Залюбовський М. В., Мільошин А. С. Автоматизована система обліку великих вантажів з реєстраторами на базі мобільних пристроїв. *Могілянські читання-2017* : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13-17 листопада 2017 р. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2017. С. 35–37.

46. Журавська І. М., Савінов В. Ю., Лавриненко С. В., Обухова К. О. Імплементация програмного забезпечення моніторингу та диспетчеризації навантаження ядер процесору рухомого пристрою. *Могілянські читання-2017* : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф. Миколаїв, 13–17 листопада 2017 р. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2017. С. 112–115.

47. Журавська І. М. Використання трансферних вузлів рухомих мереж для атаки на комп'ютерні системи наземних абонентів мережі. *Методи та засоби*

кодування, захисту й ущільнення інформації : тези доп. VI Міжнар. наук.-практ. конф., Вінниця, 24–25 жовтня 2017 р. Вінниця : Вид-во Вінниц. нац. техн. ун-ту, 2017. С. 58–60.

48. Журавська І. М. Забезпечення функціонування суб-роїв безпілотних літальних апаратів за допомогою бортових датчиків. *Датчики, прилади та системи (ДПС – 2017)* : тези доп. VI Міжнар. наук.-техн. конф., Черкаси–Миколаїв–Херсон–Лазурне, 18–22 вересня 2017 р. / Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : Видавець Третьяков О., 2017. С. 27–32.

49. Жарук Д. О., Журавська І. М., Мусієнко М. П. Програмне забезпечення на базі хмарного сервісу Google Firebase для керування безпілотними апаратами. *Інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами* : зб. тез Міжнар. наук.-практ. конф., Луцьк, 28-29 квіт. 2017 р. / Луцьк. нац. техн. ун-т. Луцьк : Вежа-Друк, 2017. С. 16.

50. Журавська І. М. Метод організації захищеного бездротового каналу з інтегрованим стежоконтейнером для моніторингової мережі відеокамер. *Інформаційна безпека та комп'ютерні технології (IS&CT 2017)* : зб. тез доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., Кропивницький, 20–22 квітня 2017 р. / Центральнoукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький : Вид-во ЦНТУ, 2017. С. 46-47.

51. Журавська І. М., Кулаковська І. В., Кулаковська А. В. Математичне моделювання мережі контейнеровозу за допомогою зв'язного графа. *Ольвійський форум-2017* : тези доп. XI Міжнар. наук.-практ. конф., Миколаїв – Коблево, 8–11 червня 2017 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2017. С. 51–54.

52. Журавська І. М., Кулаковська І. В., Мусієнко М. П. Автоматизація обліку розвантаження суден-контейнеровозів. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2017)* : тези доп. IX Міжнар. наук.-практ. конф., Херсон, 23–25 травня 2017 р. / Херсон. держ. мор. академія. Херсон : Вид-во ХДМА, 2017. С. 203–206.

53. Шуляков Д. В., Журавська І. М. Дослідження та побудова СППР для обробки, аналізу та зберігання даних для керування рухомою моніторинговою мережею. *Інтелектуальні інформаційні системи – 2016* : тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф., Миколаїв, 16–17 лютого 2016 р. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид во ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. С. 135–137.

54. Журавська І. М., Румянков Д. І. Система автоматичного керування на основі Arduino з мікроконтролером Atmega для прийняття рішень щодо керування польотом БПЛА. *Могілянські читання – 2016* : тези доп. XIX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 14–18 листоп. 2016 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2016. Т. 5. С. 24–26.

55. Журавська І. М., Олійник В. В. Підсистема катапультивання та визначення GPS-координат блоків БПЛА при критичному застосуванні. *Могілянські читання – 2016* : тези доп. XIX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 14–18 листопада 2016 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2016. Т. 5. С. 83–84.

56. Журавська І., Корецька О., Мусієнко М. Розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення. *Інтернет – Освіта – Наука – 2016* : матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф., Вінниця, 11-14 жовтня 2016 р. / Вінниц. нац. політехн. ун-т. Вінниця : ВНТУ, 2016. С. 79–81.

57. Журавская И. Н. Система восстановления пароля доступа к сторонней Wi-Fi-сети в чрезвычайных ситуациях. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист (НСБЗ'2016)* : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф., Черкаси, 21–22 жовтня 2016 р. / Черкас. ін-т пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля Нац. ун-ту цивільн. захисту України. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2016. С. 138–140.

58. Журавська І. М., Мусієнко М. П., Щебетюк В. О. Захист інформації щодо місцезнаходження БПЛА за допомогою стеганографічних рішень. *Інформація, комунікація, суспільство – 2016 (ICS – 2016)* : тези доп. V Міжнар.

наук. конф., Львів – Славське, 19–21 травня 2016 р. / Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2016. С. 24–25.

59. Журавська І. М., Мусієнко М. П., Румянков Д. І. Підвищення ефективності шифрування керуючого трафіку БПЛА засобами модифікованого блокового методу. *Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації*: тези доп. V Міжнар. наук.-практ. конф., Вінниця, 19–21 квітня 2016 р. / Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця : Вид-во ВНТУ, 2016. С. 39–41.

60. Журавська І. М., Румянков Д. І. Корпоративний месенджер з шифруванням трафіку модифікованим блочним методом на базі операції XOR. *Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі (КІСМ – 2016)*: тези доп. IX Всеукр. наук.-практ. конф., Кривий Ріг, 22–24 березня 2016 р. / Криворіз. нац. ун-т. Кривий Ріг : Вид-во ДВНЗ «Криворіз. нац. ун-т», 2016. С. 135–137.

61. Журавська І. М., Барчинський М. В., Димедюк С. В., Програмна платформа мобільної системи керування рухомою моніторинговою мережею. *Інформаційні технології та взаємодії (IT&I – 2015)*: тези доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 3–5 листопада 2015 р. / Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. Київ : Вид.-поліграф. центр «Київ. ун-т», 2015. С. 85–87.

62. Бурлаченко І. С., Денисов О. О., Журавська І. М. Вибір апаратної платформи для проектування та реконфігурації рухомих об'єктів моніторингових мереж. *Могілянські читання – 2015*: тези доп. XVIII Всеукр. наук.-метод. конф. Миколаїв, 12–20 листоп. 2015 р. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. П. Могили, 2015. Т. 1. С. 113–115.

63. Журавська І. М., Собко Д. А., Салтан Б. А. Аналіз захищеності Wi-Fi та механізми розбудови безпечної мережі. *Могілянські читання – 2015*: тези доп. XVIII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 12–20 листопада 2015 р. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. Т. 1. С. 79–81.

64. Мусієнко М. П., Журавська І. М., Юрін Д. В. Аналіз безпеки механізмів обміну даними між наземним пунктом керування та безпілотним літальним апаратом. *Інформаційні технології та взаємодії (IT&I – 2015)*: тези доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 3–5 листопада 2015 р. / Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. Київ: Вид.-поліграф. центр «Київ. ун-т», 2015. С. 47–48.

65. Журавська І. М., Поліщук Д. В. Аналіз загроз у публічних бездротових мережах та захисту користувачьких даних. *Могілянські читання – 2015*: тези доп. XVIII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 12-20 листопада 2015 р. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. Т. 1. С. 78–79.

66. Журавская И. Н., Щebetюк В. О. Создание стегоконтейнеров в телекоммуникации с БПЛА на основе Open Source протокола MAVLink. *Free and Open Source Software (FOSS-2015)*: тези доп. VII Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 24–27 листопада 2015 р., / Харк. нац. ун-ту будівництва та архітектури. Харків: Вид-во ХНУБА, 2015. С. 36.

67. Журавська І. М., Попель М. І. Автоматизація фармацевтичного складу з використанням спеціалізованих роботів, дистанційного клімат-контролю та відеоспостереження. *Могілянські читання – 2014*: тези доп. XVII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 17–21 листопада 2014 р. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. С. 63.

68. Журавська І. М., Богаченко Є. В., Вдовиченко А. В. Організація відеотрансляції прес-конференції з локальної комп'ютерної мережі на центральний канал телебачення з використанням технології VLAN. *Могілянські читання – 2014*: тези доп. XVII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 17–21 листопада 2014 р. / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. С. 57–58.

69. Журавська І. М., Божаткін С. М. Забезпечення мережевої безпеки хмарних середовищ. *Інформаційні управляючі системи та технології (ІУСТ-ОДЕСА-2013)*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 8–10 жовтня

2013 р. / Одес. нац. морський ун-т ; відп. ред. В. В. Вичужанін. Одеса : Вид-во ОНМУ, 2013. С. 207–210.

70. Журавская И. Н., Божаткин С. М. Защита компьютерной сети применительно к облачным средам. *Сучасні проблеми інформаційної безпеки на транспорті* : тези доп. III Всеукр. наук.-техн. конф. Миколаїв, 3–6 вересня 2013 р. / Нац. ун-т кораблебудування. Миколаїв : Вид-во НУК, 2013. С. 61–64.

71. Фісун М. Т., Журавська І. М., Горбань Г. В. Використання OLAP-технології для аналізу мережевого трафіку засобами об'єктної СКБД. *Комп'ютерні системи та мережеві технології (CSNT'2012)* : тези доп. V Міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 13–15 червня 2012 р. / Нац. авіац. ун-т. Київ : Вид-во НАУ, 2012. С. 129.

72. Єрьомін Б. В., Журавська І. М. Відстеження поведінкових характеристик елементів динамічного веб-сайту за допомогою теплових карт. *Ольвійський форум – 2019* : тези XIII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Миколаїв, 6-9 червня 2019 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2019. С. 83–84.

73. Журавська І. М., Божаткін С. М., Мосензов Є. О. Програмне забезпечення підбору параметрів та розробка абонентського обладнання доступу до WiFi-мережі. *Комп'ютерні системи та мережеві технології (CSNT'2010)* : тези доп. III Міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 15–17 червня 2010 р. / Нац. авіац. ун-т. Київ : Вид-во НАУ, 2010. С. 18.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

74. Musiyenko M. P., Zhuravska I. M., Burlachenko I. S., Denysov O. O. The principles of the cyber-physical components' organization based on the methods of the multi-agent interaction of the moving objects. *Advances in Cyber-Physical Systems* [Lviv Polytechnic National University]. 2016. Vol. 1, No. 1. P. 48–57.

75. Журавська І. М. Проектування та монтаж локальних комп'ютерних мереж : навч. посібник. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. 396 с.

76. Журавська І. М., Румянков Д. І. Створення модифікованого блокового методу шифрування на базі операції XOR для корпоративного месенджера. *Наукові праці* ; Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили. Серія : Комп'ютерні технології : наук.-метод. журн. Миколаїв, 2015. Т. 266, Вип. 254. С. 97–104.

77. Журавська І. М. Проектування комп'ютерних мереж. Ч. I : Локальні мережі : навч.-метод. посібник. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. 124 с. (Методична серія ; вип. 171).

78. Журавская И. Н. Современное состояние резонансных высоковольтных высокочастотных источников питания. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий* : сб. науч. тр. / Отв. ред. В. В. Шамко. Киев : Наук. думка, 1995. Вып. 2. С. 110–113.

79. Пат. на корисну модель 132326 Україна, МПК (2006) В64С 29/00. Спосіб формування підйомної сили безпілотного літального апарату для підйому і переміщення предметів у повітряному середовищі / І. М. Журавська. № u 2018 08711 ; заявл. 14.08.2018 ; опубл. 25.02.2019, Бюл. № 4.

80. Пат. на винахід 21356А Україна, МПК (2006.01) Н03К 17/61. Спосіб передачі уніполярних прямокутних імпульсів через гальванічно розв'язане коло та пристрій для його здійснення / Л. М. Мірошніченко, І. М. Журавська, О. М. Пусєв. № 93007773; заявл. 08.12.93 ; держ. реєстр. 02.12.97 ; опубл. 30.04.98, Бюл. № 2.

81. Пат. на винахід 3031 Україна, МПК (2006.01) Н01L 23/34. Пристрій для охолодження напівпровідникових приладів / Л. М. Мірошніченко, О. С. Євстаф'єв, І. М. Журавська, О. М. Пусєв, М. В. Турти. № 93300896 ; заявл. 16.03.93 ; держ. реєстр. 29.04.94; опубл. 26.12.94, Бюл. № 5-І.

82. Пат. на винахід 3033 Україна, МПК (2006.01) Н02М 3/335. Багатоканальний перетворювач напруги / О. М. Пусєв, І. М. Журавська, Л. М. Мірошніченко, В. М. Рябенький. № 93300894 ; заявл. 16.03.93 ; держ. реєстр. 29.04.94 ; опубл. 26.12.94, Бюл. № 5-І.