


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧОРНОМОРСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ

**Журавська Ірина Миколаївна**



УДК 004.77: 629.734: 004.03

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

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Миколаїв – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Чорноморському національному університеті імені Петра Могили Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Мусієнко Максим Павлович,**  
Чорноморський національний університет імені Петра Могили, професор кафедри комп'ютерної інженерії.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Кулик Анатолій Ярославович,**  
Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова, завідувач кафедри біофізики, інформатики та медичної апаратури;

доктор технічних наук, професор  
**Мірошник Марина Анатоліївна,**  
Український державний університет залізничного транспорту, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем;

доктор технічних наук, професор  
**Нікольський Віталій Валентинович,**  
Національний університет «Одеська морська академія», професор кафедри теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки.

Захист відбудеться «09» жовтня 2019 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.053.05 у Чорноморському національному університеті імені Петра Могили за адресою: вул. 68 Десантників, 10, Миколаїв, 54003.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Чорноморського національного університету імені Петра Могили за адресою: вул. 68 Десантників, 10, Миколаїв, 54003, та за електронною адресою: <https://chmnu.edu.ua/disertatsiyi/>.

Автореферат розісланий «06» вересня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Є. О. Давиденко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність.** Створення та функціонування сучасних комп'ютерних мереж критичного застосування є важливою науковою та соціально-економічною проблемою світового рівня, обумовленою поширенням використання автономних безпілотних систем, які поєднані при взаємодії у швидкодинамічні комп'ютерні мережі, виконують свої функції та керуються власниками на великій відстані засобами гетерогенних каналів зв'язку. Такі автономні системи (як поодинокі, так і караванного типу) вже використовуються та плануються до впровадження у різних галузях господарства – вантажних перевезеннях морським (наприклад, проект ААWA компанії Rolls Royce у Фінляндії, безпілотний есмінець «Sea Hunter» у США до 19 тис. км), повітряним (наприклад, 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.), а також у 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). Так, Міністерство оборони США анонсувало запуск у жовтні 2016 р. рою з 103 міні-безпілотників Perdix. У Китаї в червні 2017 р. заявили про створення рою з 119 БПЛА, який функціонує на основі штучного інтелекту. Компанія Intel вже запускала рої з 1218 та з 1374 дронів з централізованим управлінням та планує збільшити кількість безпілотних літаків у групі до 1500 штук.

В той же час оборонно-промисловий комплекс Росії та Великобританії активно займається розробленням засобів радіоелектронної боротьби (наприклад, сімейство комплексів радіоелектронної боротьби «Красуха») та електронної війни на основі нейромережевих алгоритмів. 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.

Теоретичною та методологічною базою дослідження є наукові праці щодо керованих та автономних інформаційно-вимірювальних систем та компонентів до них таких провідних вчених, як О. Д. Азаров, С. Г. Антощук, М. І. Васюхін, В. С. Глухов, І. Д. Горбенко, І. А. Жуков, О. В. Збруцький, В. М. Карташов, В. П. Квасніков, Р. Н. Кветний, Ю. П. Кондратенко, В. В. Кочан, А. Я. Кулик, Г. А. Кучук, С. В. Ленков, В. А. Лужецький, М. В. Максимов, А. О. Мельник, М. А. Мірошник, В. В. Нікольський, В. М. Опанасенко, Д. П. Орнатський, В. М. Рудницький, А. О. Саченко, С. Г. Семенов, В. С. Ситніков, С. О. Субботін, О. М. Трунов, М. Т. Фісун, В. С. Харченко, В. І. Хаханов, О. К. Юдін, В. В. Яцків,

R. Austin, J. Child, M. Durišić, Z. Zh. Tafa, G. Dimić, V. Milutinović, Y. S. Choi, J. S. Park, O. Levander, T. Prevot, P. Kopardekar, J. Rios, J. Jung, N. Roddey, W. Zhang, M. W. Müller, R. D'Andrea, H. Hamann та ін.

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.

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, reference number 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, reference number 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, reference number 543968-TEMPUS-1-2013-1-EE-TEMPUS-JPCR, 2013–2017 pp.), в яких здобувач взяла участь як ментор проєктів “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, reference number 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.\у (Cut and Dry)” (*ПЕРШЕ місце*, травень 2016 р.);

– Міжнародної програми ЄС Erasmus+ “Internet of Things: Emerging Curriculum for Industry and Human Applications” (Erasmus+ ALIOT, reference number 573818-EPP-1-2016-1-UK-EPPKA2-SBHE-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-SBHE-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 (ІПТТ) 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 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 найсучаснішого інтерактивного навчально-тренажерного та аналітично-консультативного комплексу військово-цивільного призначення» (№ держ. реєстрації 0118U000193, 2018–2019 pp.), в якій здобувач брала участь як 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 pp.), в якій здобувач брала участь як відповідальний виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп’ютерних

мереж критичного застосування (ШГКМ) за рахунок подовження часу життя БПЛА та підвищення стійкості ШГКМ до перешкод і зовнішніх впливів різного походження.

Для досягнення поставленої мети у роботі поставлені 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 уточнення 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 неперіоритетних пристроїв та передаванням енергії між КФО за технологією PoWiFi;
- 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;
- впровадити результати досліджень.

**Об'єкт** – процеси створення та функціонування рухомих комп'ютерних мереж.

**Предмет** – 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 Лєві», 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 ШГКМ 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 основі нейронної мережі Хопфілда за рахунок використання бінарної моделі польотної карти, що дозволяє здійснювати «самозагоєння» рою під час критичного застосування ШГКМ;

- метод усунення дублювання виконання функцій БПЛА за рахунок розроблених засобів управління режимами роботи неперіоритетних модулів БПЛА, 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 у 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 стежоконтейнері 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 об'єктами (КФО) з використанням 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 навантаженості кожного ядра, що дозволило зменшити енергоспоживання процесора та підвищити швидкість реагування на критичну ситуацію;

- 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 капітана 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 катапультування блоків пам'яті та визначення GPS-координат БПЛА задля 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.

*Результати дисертаційної роботи використано і впроваджено:*

- на контейнеровозі «CSCL Uranus» (zareєстрований у Hong Kong) для створення комп'ютерної системи інформування капітана судна щодо кількості контейнерів у кожній секції, перенесених через борт контейнеровоза портокраном;

- 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» для забезпечення захищеного зв'язку між об'єктами розгалуженої мережі складів за рахунок та стеганографічного закриття GPS-координат зазначених об'єктів;

- при виконанні науково-дослідних робіт, які виконувались в ІІІТ 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», «Комп'ютерні мережі» та ін., а також при підготовленні магістерських робіт зі спеціальностей «Комп'ютерні науки» та «Комп'ютерна інженерія».

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення і практичні результати, які містяться в дисертації, отримані здобувачем 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 багатопроекторних 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 майбутнє» (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. «Могилянські читання» (Миколаїв, 2015, 2016, 2017), 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).

**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 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 275 сторінок основного тексту), 142 рисунки, 21 таблиця.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наведено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, зазначені відомості щодо публікацій, апробації та впровадження результатів дослідження.

**Перший розділ** містить результати аналізу існуючих підходів вирішення задач управління групою безпілотних апаратів (БПА) як рухомої комп'ютерної системи (КС). Зважаючи на те, що найбільшого поширення набули БПА, що пересуваються у повітряному середовищі, тобто безпілотні літальні апарати (БПЛА), найбільша увага приділена формуванню КС саме на основі БПЛА. Розроблено узагальнену класифікацію структур мережевої взаємодії об'єктів таких КС за ознаками гетерогенності, швидкодинамічності, критичності застосування, централізованості управління з КЦ, розбиття на суб-рої, наявності головних («лідуючих») БПЛА та характеристик їх апаратних компонентів, здатності автономної поведінки в залежності від типу умов, в яких працює система, типу виконуваних задач. В комплексі розглянуті різноманітні характеристики технологічно неоднорідних рухомих моніторингових мереж (РММ), які узагальнені за критерієм гетерогенності в організаційну діаграму (рис. 1).



Рисунок 1 – Зведені показники РММ за критерієм гетерогенності

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 БПЛА, а також безпосередньо на КЦ, тому подальшим розвитком є побудування гетерогенних структур комп'ютерних мереж 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 РММ (рис. 2).

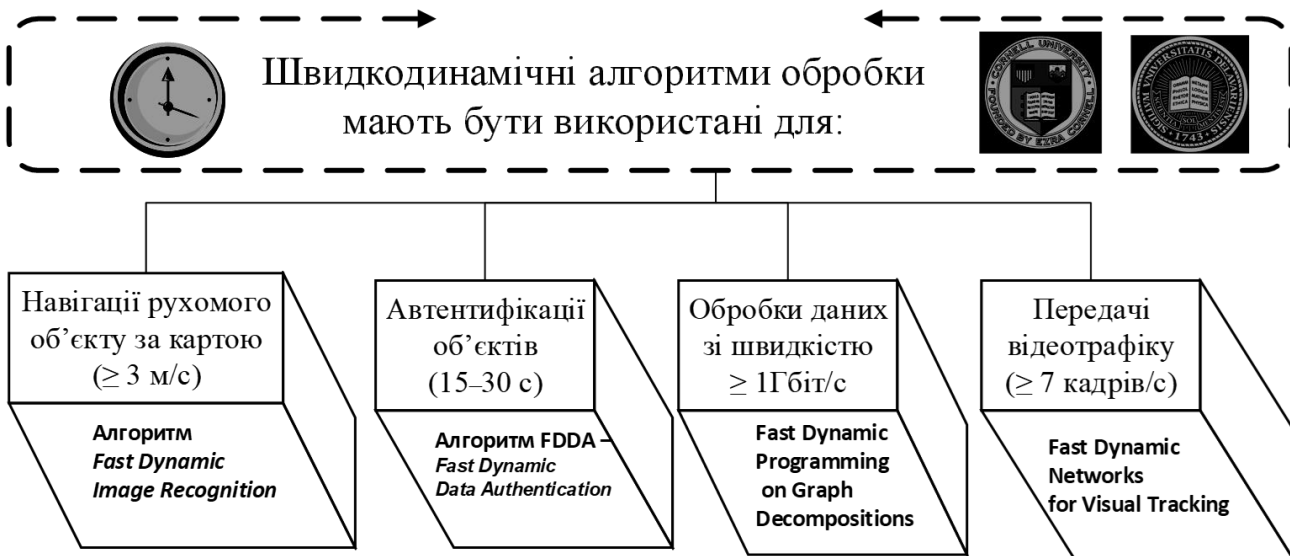


Рисунок 2 – Швидкодинамічні процеси в РММ

Сформульовані вимоги до характеристик електронних компонентів та програмних функцій, які мають бути реалізовані у польотному контролері на борту БПЛА. Обґрунтовано доцільність використання нейронної мережі Хопфілда (НМХ) для формування маршрутів пересування БПЛА в обмежених просторових коридорах.

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

**Другий розділ** містить результати наукових досліджень, пов'язаних з удосконаленням методу моделювання траєкторії руху БПЛА на основі стохастичних диференціальних рівнянь Ланжевена. 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 стохастичних диференціальних рівнянь (СДР) 1-го порядку:

$$\begin{cases} \vec{v} = \frac{d\vec{R}}{dt}, \\ m \frac{d\vec{v}}{dt} = -\gamma \vec{v} + \vec{\Psi}(t), \end{cases} \quad (1)$$

де  $m$  – маса частинки (подібна масі БПЛА);

$\gamma$  – 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;

$\vec{\Psi} = (\Psi_1, \Psi_2)^T$  – шумовий компонент, який описує випадкові сили, що діють на частинку і представляють собою стохастичний процес (аналогічний впливу дії засобів РЕБ, керуючі сигнали 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. За такими умовами модель на основі рівняння Ланжевена для броунівського руху з дрейфом виглядатиме:

$$d\vec{R}_t = \vec{A}(\vec{R}_t, t)dt + \vec{F}(t), \quad (2)$$

де функція  $\vec{A}(\vec{R}_t, t)$  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  $W_t$ :

$$d\vec{R}_t = \vec{A}(\vec{R}_t, t)dt + \vec{B}(\vec{R}_t, t)dW_t, \quad (3)$$

де  $W_t$  – стандартний броунівський рух або стандартний вінерівський процес, тобто стохастичний процес, неперервний на інтервалі  $t \in [0, T]$ ;

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. Опис руху БПЛА може включати в себе 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 стохастичного компонента у рівняння, що описує рух одного БПЛА. Тоді рівняння (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.

Для одновимірного простору (без врахування швидкості, яка вважається за константу) в диференціальній формі рівняння Ланжевена можна записати, як:

$$\begin{aligned} d\vec{R}_t &= \lambda\vec{R}(t)dt + \mu\vec{R}(t)dW(t), \\ \vec{R}(0) &= \vec{R}_0, \quad 0 \leq t \leq T, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\lambda$  і  $\mu$  – константи, такі, що  $\lambda\vec{R} = \vec{A}(\vec{R})$  та  $\mu\vec{R} = \vec{B}(\vec{R})$  в (3).

Щоб знайти точне аналітичне рішення (4) для визначення траєкторії БПЛА запропоновано застосувати модель Блека-Шоулза, розроблену та діючу на фінансовому ринку для ціноутворення на опціони. Як і зміна просторових координат БПЛА, зміна ціни має безперервний характер і описується за допомогою простого вінерівського процесу. Точне рішення рівняння Ланжевена можна представити у вигляді рівняння Блека-Шоулза:

$$\vec{R}_t = \vec{R}_0 \cdot \exp\left(\left(\lambda - \frac{1}{2}\mu^2\right)t + \mu \cdot W(t)\right), \quad (5)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт дрейфу БПЛА;

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

$W(t)$  – вінерівський процес.

Для дискретизації рівняння (4) використаний один з найбільш економних (з точки зору витрачання обчислювальних ресурсів) – чисельний метод Ейлера-Маруями, за яким чисельне рішення рівняння Ланжевена (4) набуває вигляду:

$$\begin{cases} R_j = R_{j-1} + \lambda R_{j-1} \Delta t + \mu R_{j-1} (W_{t_j} - W_{t_{j-1}}), j = 1, 2, \dots, L, \\ W_{t_j} - W_{t_{j-1}} = W(jP\Delta t) - W((j-1)P\Delta t) = \sum_{k=jP-P+1}^{jP} dW_k \\ dW_k = \Delta t^{\frac{1}{2}} \cdot \mathcal{N}(0,1). \end{cases} \quad (6)$$

Запропонований підхід надає можливість прогнозувати поведінку групи (зграї, рою) БПЛА з урахуванням зовнішніх збурень на подобу броунівського руху. Чисельне рішення, отримане в пакеті MATLAB, показало, що середній відсоток похибки моделі на основі метода Ейлера-Маруями складає 8,2 %, тому запропоновану вдосконалену модель доцільно застосовувати до прогнозування траєкторії руху БПЛА. Для врахування аномальних дифузійних явищ у русі БПЛА

(супердифузії) можливо використати математичну схему руху, що зветься «прогулянкою Лєві» або «польотом Лєві» та має чергуватися з броунівським рухом.

Тоді модель траєкторії руху БПЛА на основі рівняння Ланжевена (4), її точне рішення (5) з використанням рівняння Блека-Шоулза (БШ) та чисельна апроксимація (6) за Ейлером-Маруямою для процесу супердифузії з врахуванням «прогулянок Лєві» (ЕМЛ) зміниться через зміну приросту незалежної випадкової величини вінерівського процесу у стохастичному члені початкового рівняння з заміною нормального розподілу на розподіл Лєві з індексом стійкості  $0 < \sigma < 2$ . Тобто, моменти їх приростів кінцеві, але самі процеси є негаусовими. Окрім відхилень від траєкторії через механічні перешкоди з поверненням на маршрут та дотриманням безперервності траєкторії, також 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».

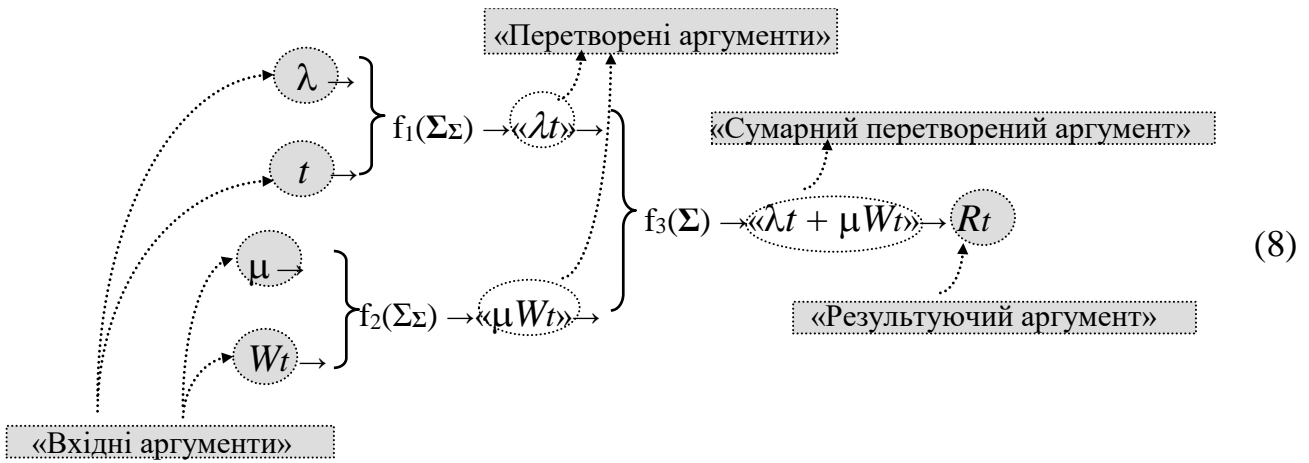
«Лєвіподібний» або «броуноподібний» маршрут дозволяє спрогнозувати зменшення активного часу використання батареї через зовнішні впливи та визначити довжину реальної траєкторії  $S_T$ , пройденої БПЛА до моменту необхідної дозарядки акумуляторів. Результуюча робоча модель розрахунку часу життя КФО з розрахунком траєкторії БПЛА на основі рівнянь Ланжевена з урахуванням «прогулянок Лєві» може бути записана у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_j = R_{j-1} + \lambda R_{j-1} \Delta t + \mu R_{j-1} (W_{t_j} - W_{t_{j-1}}), j = 1, 2, \dots, L, \\ W_{t_j} - W_{t_{j-1}} = W(jP\Delta t) - W((j-1)P\Delta t) = \sum_{k=jP-P+1}^{jP} dW_k \\ dW_k = \left( 1 - \Delta t^{\frac{1}{2}} \cdot \mathcal{N}(0,1) \right)^{-\frac{1}{\sigma}}, \quad 0 < \frac{1}{\sigma} < \frac{1}{2}, \\ S_T = \sum_{j=1}^L |R_j|, \quad |R_T| \neq |R_0| + S_T, T = L \cdot \Delta t. \end{array} \right. \quad (7)$$

Такий удосконалений метод моделювання траєкторії БПЛА на основі стохастичних диференціальних рівнянь Ланжевена для броунівського руху за рахунок застосування «прогулянок Лєві»/«польотів Лєві», фінансової моделі Блека-Шоулза дозволяє враховувати у траєкторії БПЛА механічні перешкоди та зовнішні збурення, здатний попередити критичне застосування та навіть втрату дрона

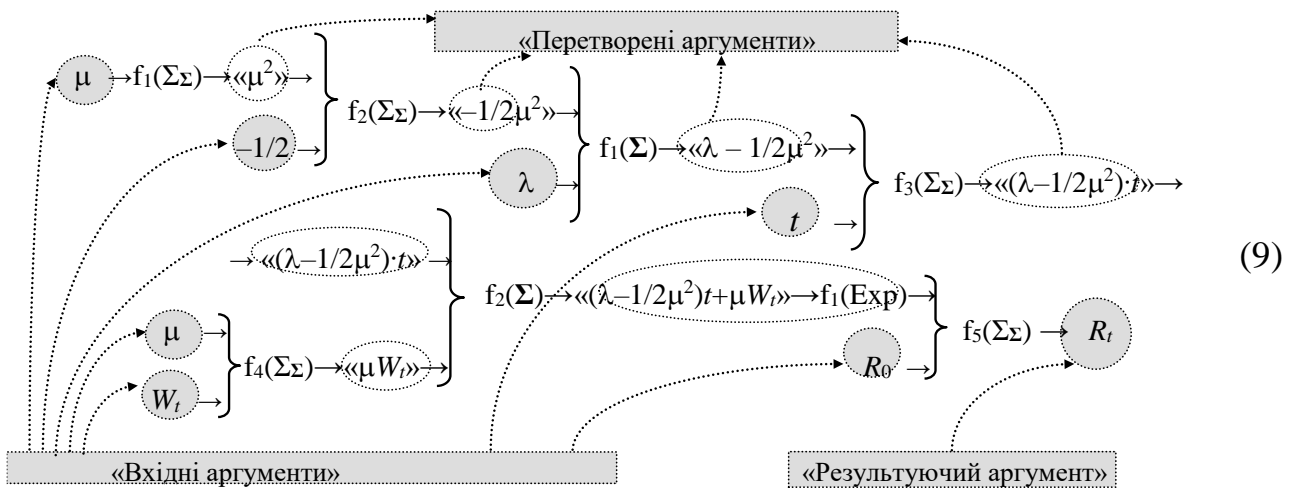
Для забезпечення більшої відповідності математичних моделей траєкторії руху БПЛА схемним структурам, де функції зображуються у вигляді логічних елементів, на яких базуються комп'ютерні компоненти, запропоновано використати графо-аналітичний спосіб запису таких моделей.

Наприклад, у графо-аналітичній формі модель (4) 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  $\lambda$  та  $t$  з формуванням «Перетвореного аргументу»  $\langle \lambda t \rangle$ ;  $f_2(\Sigma_\Sigma)$  – функціональна структура другого помножувача, яка виконує процедуру множення вхідних аргументів  $\mu$  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»  $R_t$ .

Для точного рішення рівняння Ланжевена за допомогою рівняння Блека-Шоулза (5) графо-аналітична модель виглядатиме, як:



де функціональні структури аналогічні описаним для (8).

Запропоновані теоретичні рішення перевірені результатами моделюванні точної та апроксимованої траєкторії руху БПЛА як об'єкта броунівського руху у середовищі MATLAB (рис. 3).

У порівнянні з траєкторією руху БПЛА на базі рівняння Ланжевена з урахуванням «дрейфу» (рис. 4), розробленою австрійськими вченими у 2010 р. (Н. Наман та ін.), яка була прийнята за основу, в запропонованій моделі враховано зміна маршруту через обминання механічної перешкоди (будівлі).





Рисунок 3 – Моделювання траєкторії руху БПЛА: точне рішення за методом БШ (суцільна лінія) та апроксимація за методом ЕМЛ (штрихова лінія із зірочками)

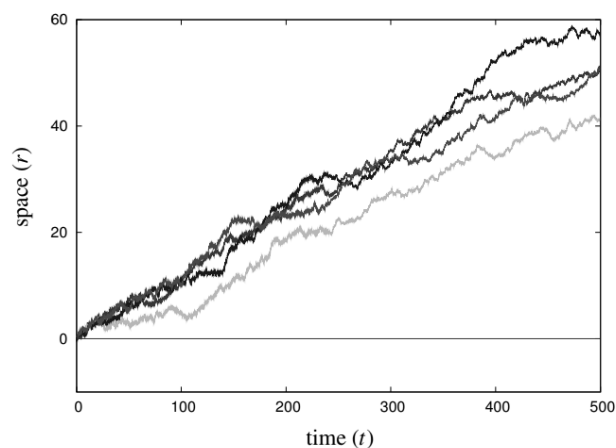


Рисунок 4 – Одновимірні траєкторії зграї з 4 БПЛА з урахуванням дрейфу (за Н. Namann)

Таким чином, замість лінійного або броунівського руху, на стохастичну поведінку зграї БПЛА був втрачений час, тому при русі в умовах збільшеного зовнішнього збурення ( $\lambda=1,5$ ) на подолання передбаченої лінійної відстані (маркер на лінії 3 рис. 5) заряд акумулятора буде витрачений приблизно за  $0,78t$  від максимального часу польоту, вказаному в технічній документації для БПЛА DJI Phantom 4.

З рис. 5 випливає, що при посиленні зовнішніх збурень, які відповідають коефіцієнтам дрейфу  $\lambda = 2$  та  $\lambda = 3$ , БПЛА DJI Phantom 4 витратить весь заряд акумулятора відповідно вже через  $\approx 62\%$  та  $\approx 45\%$  від максимального часу польоту, вказаному в технічній документації. При цьому реальна траєкторія польоту БПЛА буде чисельно дорівнювати довжині запланованого лінійного маршруту, але фактично пройдений лінійний маршрут буде суттєво менший.

За допомогою розробленої моделі (7) можливо визначити, на який час буде скорочений політ БПЛА при різних зовнішніх збуреннях, Для цього необхідно змінювати коефіцієнт дрейфу  $\lambda$  при фіксованому коефіцієнті  $\mu$ , що враховує стохастичний рух дрона (рис. 6).

Сімейство кривих довжини траєкторії вказаної моделі дрона можна використовувати як номограму для визначення реального часу (маркери на лінії), через який дрон треба відправляти на дозарядку в залежності від зовнішніх збурень. Наприклад, при сильному зустрічному вітрі ( $\lambda=3$ ) акумулятор 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.

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).

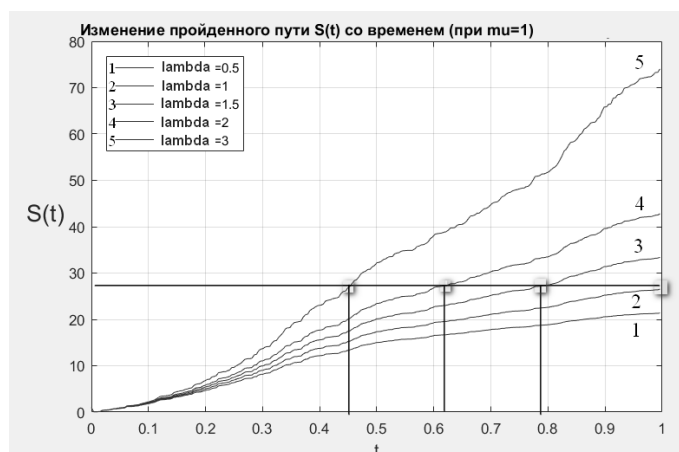


Рисунок 5 – Зменшення часу життя БПЛА в залежності від збурень ( $\lambda=1$  при  $v_{\text{БПЛА}}=15$  м/с та вітром 3 м/с)



Рисунок 6 – Моделювання траєкторії руху БПЛА різних розмірів та потужності

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

Для моделювання броуноподібного руху за рівняннями Ланжевена (4) розмір об'єкта руху  $\alpha$  може бути врахований у коефіцієнті  $\mu$  (аналогічному до коефіцієнту дифузії броунівського руху) при стохастичній складовій рівняння Ланжевена. Виходячи з того, що коефіцієнти  $\mu$  аналогічний до коефіцієнту дифузії, можна зауважити, що чим більший розмір БПЛА, тим менше на нього вплив стохастичних процесів.

Тоді використаємо для моделювання масив  $\mu_i = [0,2; 1; 1,5; 2; 3]$ , де  $\mu = 1$  (лінія 2 на рис. 6) відповідає прототипному БПЛА DJI Phantom 4,  $\mu = 1,5$  (лінія 3 на рис. 4) характеризує рух майже такого ж за розмірами, але менш потужного з досліджуваних БПЛА UDIRC LarkFPV. Моделювання проводилось з урахуванням зовнішніх збурень  $\lambda = 2$ .

Розраховані показники якості розробленої моделі (середнє квадратичне відхилення, середній відсоток похибки, коефіцієнт детермінації, індекс Тейла та ін.) дозволяють зробити висновок щодо доцільності застосування запропонованої моделі (7) до прогнозування траєкторії руху БПЛА.

**Третій розділ** містить результати теоретичних розробок та моделювання процесів керування групою БПЛА у просторових коридорах. Наведені варіанти розбиття БПЛА на групи з врахуванням території виконуваного завдання та планування маршруту для кожного суб-рою окремо. Виконана класифікація топологій РММ на основі розосереджених БПЛА у 2D-просторі. Для найчастіше вживаних топологій РММ (рис. 7, 8) розроблений уточнений метод визначення площі функціонування РММ на основі прямокутника Брахмагупти з урахуванням зміни топології РММ під час руху (рис. 9).

Для спрощення алгоритмізації виконуваної задачі визначаються координати прямокутника, утвореного найвіддаленішими вузлами топології РММ, що дозволяє його вважати геометрично завжди опуклим (рис. 10).

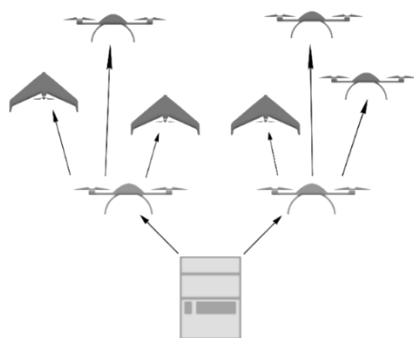


Рисунок 7 – Топологія «ієрархічна зірка»

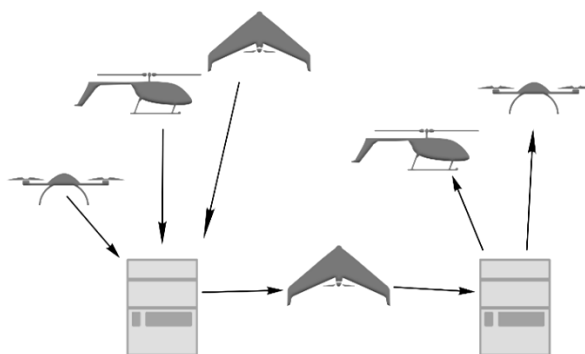
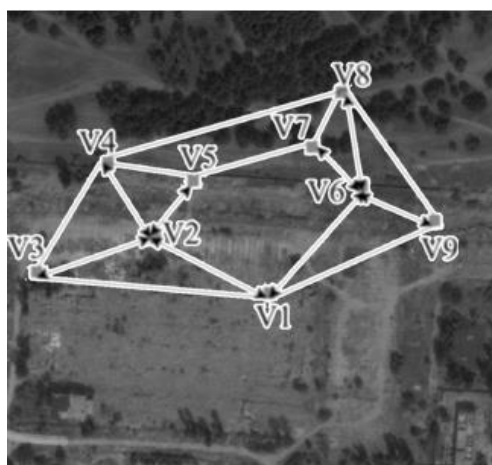
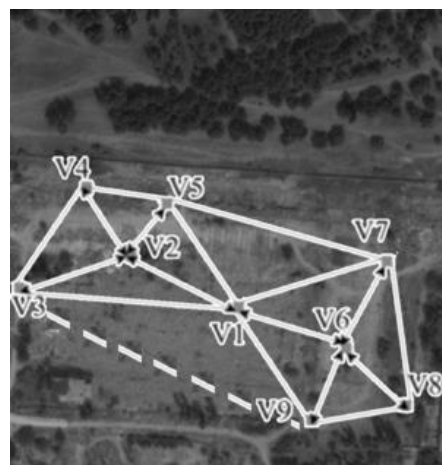


Рисунок 8 – Топологія «мережево-центрична»



а)



б)

Рисунок 9 – Зміна топології РММ під час руху

Тоді вважаючи, що зовнішні (крайні) БПЛА зграї орієнтовані за сторонами світу  $N$  (північ),  $Z$  (південь),  $W$  (захід) та  $E$  (схід), площа, охоплена РММ, за правилами Брамагупти для такого прямокутника (рис. 10) набуває вигляду:

$$S_{B.p.} = (111,2 \cdot 10^3)^2 \cdot (\text{lon}_W - \text{lon}_E)(\text{lat}_N - \text{lat}_Z) \cdot \cos[\text{lat}_N]. \quad (10)$$

де 111,2 – довжина дуги  $1^\circ$  меридіана та  $1^\circ$  паралелі на екваторі (вважається однаковою згідно з основами авіаційної картографії), км;

$\text{lat}_N$  та  $\text{lat}_Z$  – відповідно координати широти самого північного та самого південного вузла  $p$ -го кластера БПЛА;

$\text{lon}_W$  та  $\text{lon}_E$  – відповідно координати довготи крайніх БПЛА у кластері на заході та на сході;

$[\text{lat}_N]$  – ціла частина координати широти з округленням за Айверсоном.

Для рис. 9 розглянутий прямокутник утворюється вузлами  $V1-V3-V8-V9$ , і формула Брамагупти (10) виглядатиме як:

$$S_{B.p.змш.} = (111,2 \cdot 10^3)^2 (\text{lon}_{V9i} - \text{lon}_{V3i})(\text{lat}_{V8i} - \text{lat}_{V1i}) \cdot \cos([\text{lat}_{V8i}]). \quad (11)$$

Але, можна стверджувати, що похибка обчислень площі зграї БПЛА з використанням формули Брамагупти буде зависокою, оскільки управління БПЛА здійснюється таким чином, щоб обмін даними між БПЛА був надійнішим, тому зграя виглядатиме більш скупченою, ніж прямокутник Брамагупти.

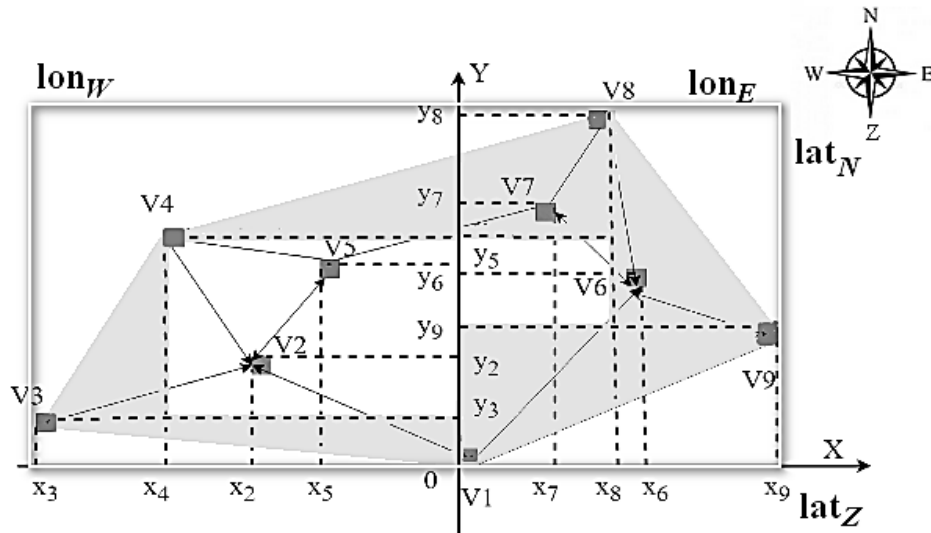


Рисунок 10 – Багатокутник РММ з вузлами за змішаною топологією та прямокутник Браhmaгупти (за зовнішніми вузлами РММ)

Запропонований метод визначення площі функціонування зграї БПЛА на основі прямокутника Браhmaгупти з урахуванням зміни топології РММ на основі зграї БПЛА 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  $V_1$  (рис. 9, а), виглядає для багатокутника на рис. 10, як:

$$P = \{V_1, V_3, V_4, V_8, V_9, V_1\}. \quad (12)$$

Уточнена площа  $S_{\text{ут.змш.}}$ , яку охоплює зграя 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 (12) вершин  $P$ , які не належать до 2 зовнішніх вузлів багатокутника за порядком обходу  $P$  (рис. 10):

$$\begin{aligned} S_{\text{ут.змш.}} = & \left| \frac{y_1 - y_3}{2} (x_1 - x_3) \right| + \left| \frac{y_3 - y_4}{2} (x_3 - x_4) \right| + \left| \frac{y_4 - y_8}{2} (x_4 - x_8) \right| + \\ & + \left| \frac{y_8 - y_9}{2} (x_8 - x_9) \right| + \left| \frac{y_9 - y_1}{2} (x_9 - x_1) \right| + |(y_3 - y_4)(x_1 - x_4)| + \\ & + |(y_4 - y_9)(x_1 - x_8)|. \end{aligned} \quad (13)$$

Результати розрахунків площі функціонування суб-рою БПЛА на рис. 9, а, виконані за розробленим уточненим методом визначення площі функціонування БПЛА, наведені у табл. 1.

Запропонований метод розрахунку площі функціонування РММ підвищує точність визначення необстеженої площі на 15,1 % завдяки урахуванню більшої скупченості зграї ніж прямокутник Браhmaгупти для забезпечення надійного обміну даними між БПЛА.

Таблиця 1 – Площі функціонування зграї БПЛА згідно з GPS-координатами

Площа в $i$ -й момент часу, м <sup>2</sup>		Необстеже на площа, %	Площа в $j$ -й момент часу, м <sup>2</sup>		Необстежена площа, %
за формулою Брахмагупти	за уточненим методом		за формулою Брахмагупти	за уточненим методом	
46208	40162	15,1	49503	37109	33,4

Для економії обчислювальних потужностей та прискорення обстеження території удосконалено метод розбиття гетерогенної зграї БПЛА на суб-рої з вирішенням задачі комівояжера (TSP) для кожного суб-рою окремо (рис. 11, 12).

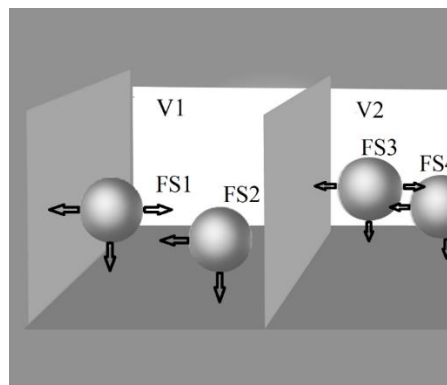
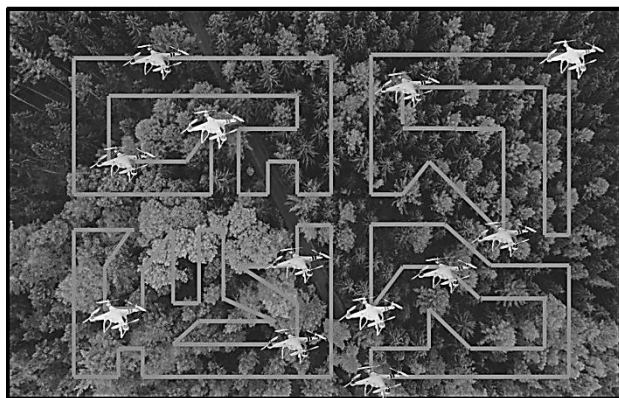


Рисунок 11 – Розподіл території на 4 сектори для кожного суб-рою з трьох БПЛА

Рисунок 12 – Парний рух БПЛА

В такому разі 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 та його закінчення. Об'єкти здійснюють складний просторовий рух, який розглядається як комбінація поступального й обертального рухів деякої точки або сукупності точок.

В такому разі суб-рої БПЛА виконують аналогічні завдання в обмежених просторових коридорах, тобто 3D-завдання розбивається на декілька двовимірних, що паралельно вирішуються на різних обчислювальних ресурсах, з подальшою конкатенацією знайдених 2D-рішень TSP в загальне рішення, що дозволяє, наприклад, на 11,6 % прискорити обстеження території суб-роєм з 6 БПЛА.

Побудована неперервна просторово-часова модель поведінки гетерогенної зграї з 5 БПЛА двох конструкцій, які виконують розподілену технологічну задачу за складними геометричними траєкторіями (рис. 13, 14), що не можуть бути описані математичними залежностями. Відпрацьовані алгоритми запобігання зіткненням БПЛА та повернення дронів на власні бази (точки старту) для підзарядки акумуляторних батарей з наступним продовженням руху по своїй траєкторії.

Задля уникнення дублювання виконання завдань у точках сітки, яка охоплює обстежувану територію, запропонований метод синтезу суб-оптимальних маршрутів суб-роїв БПЛА на основі нейронної мережі Хопфілда (НМХ). Для кожного  $n$ -го суб-рою складається окрема польотна карта та формується просторовий коридор  $SCn$  довільної форми (рис. 15).

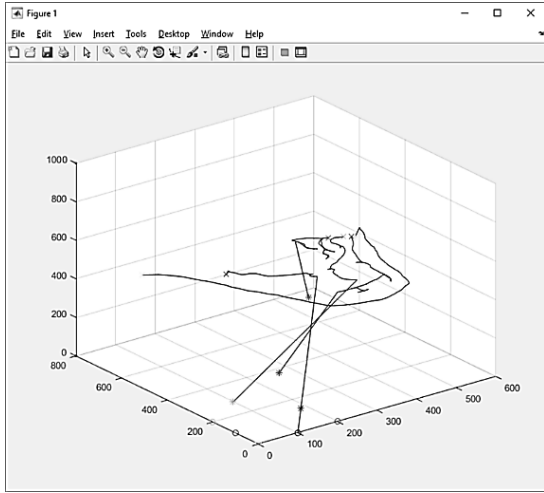


Рисунок 13 – Просторове положення та рух на бази для підзарядки дронів двох суб-роїв з п'яти БПЛА

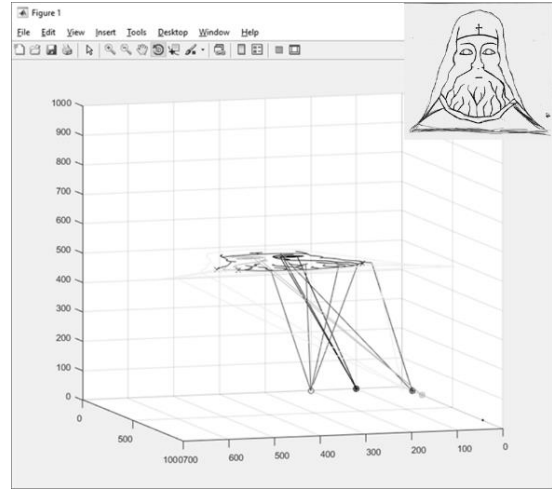


Рисунок 14 – Відображення циклів перезарядки батарей кожним БПЛА під час виконання завдання за складною траєкторією (справа зверху)

Ідея запропонованого 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. Такий підхід забезпечить виключення дубляжу дій дрона у вже обстеженому вузлу. Навіть, якщо дрон 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. Координати цілі (вузли координатної сітки), а також інформація, чи є ці вузли вже обстеженими, надходять на вхід НМХ (рис. 16), яка являє собою шар адаптивних суматорів із зворотними зв'язками, вихідні сигнали яких надходять з часовою затримкою  $\Delta t_{ij}$  на входи нейронів, в результаті чого вихідний сигнал НМХ формується лише після того, як мережа досягне динамічної рівноваги.

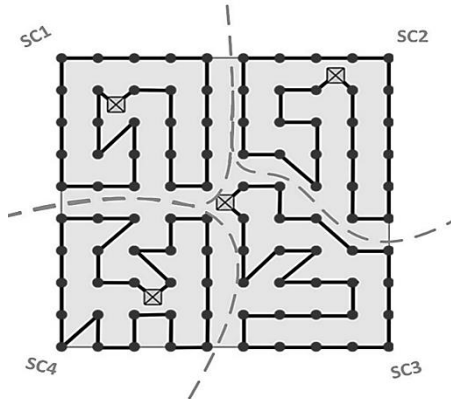


Рисунок 15 – Розподіл координатної сітки польотів на просторові коридори  $SC_n$  при рознесених точках вильоту

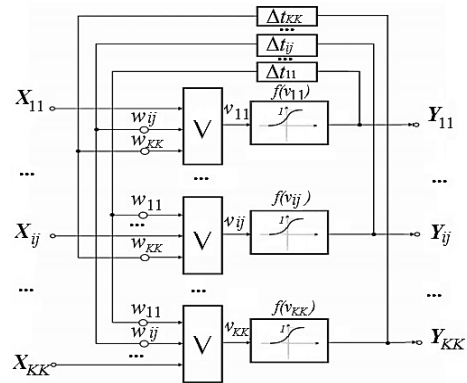


Рисунок 16 – Графічне зображення нейронної мережі Хопфілда для просторових коридорів  $SC_n$

Математично подібний нейрон (рис. 16) описується за допомогою системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{ij} = f(v_{ij}); v_{ij} = \bigvee_{\substack{i=1 \\ j=1}}^{K,K} x_{ij} \cdot w_{ij} + D_{ij}; \\ D_{ij} = 1, P_{ij} \notin SC_n; D_{ij} = 0, P_{ij} \in SC_n; \\ w_{ij} = 1, \text{ якщо довжина маршруту між вузлами } L; \\ w_{ij} = 1,4, \text{ якщо довжина маршруту між вузлами } \sqrt{L^2}. \end{array} \right. \quad (19)$$

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.

При плануванні маршруту суб-рою на основі розподіленої НМХ кожен з дронів суб-рою формує власну нейронну мапу і виконує її динамічне коригування за початковими даними і за інформацією від датчиків на дроні. Сформовану нейронну мапу 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 мапу. Кількість таких координатних сіток на обстежуваній мапі відповідає кількості вильотів зграї дронів для виконання поставленої задачі з обстеження території.

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. 7, 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 (для даного суб-рою точка вважається вже обстеженою). Ця ж матриця  $A$  є нейронною мапою НМХ (20):

$$A = \left\| a_{ij}^{(n)} \right\|_1^K = \left\| \begin{array}{cccc} a_{11}^{(1)} & \dots & a_{1j}^{(n)} & \dots & a_{1K}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1}^{(n)} & \dots & a_{ij}^{(n)} & \dots & a_{iK}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{K1}^{(n)} & \dots & a_{Kj}^{(n)} & \dots & a_{KK}^{(N)} \end{array} \right\|, \quad (20)$$

На другому етапі згідно з запропонованим методом для кожного  $n$ -го суб-рою складається окрема нейронна мапа НМХ  $A_n$  за правилами (21):

$$\left\{ a_{ij}^{(n)} \mid n = \overline{1, N}; a_{ij}^{(n)} \mid i = \overline{1, K}; a_{ij}^{(n)} \mid j = \overline{1, K} \right\}; \quad (21)$$

$$a_{ij}^{(n)} = 0, \text{ якщо } a_{ij} \in SC_n; a_{ij}^{(n)} = 1, \text{ якщо } a_{ij} \notin SC_n.$$

Тобто, якщо  $a_{ij}^{(n)} = 1$ , то такий вузол для  $n$ -го суб-рою вважається вже обстеженим. Наприклад, для координатної сітки розміром  $10 \times 10$  точок, яка поділена на 4 просторові коридори (рис. 14), матриці подій  $A_n$  для просторових коридорів  $SC_1$  та  $SC_2$  виглядатимуть, як наведено у (22):

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}; A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Для інших коридорів  $SC_n$  матриця  $A_n$  будується аналогічно.

На третьому етапі виконується синтез маршрутів дронів суб-рою в межах кожного  $n$ -го просторового коридору. При цьому враховані обмеження технічної реалізації такої топології РММ на основі зграї БПЛА, що складається з суб-роїв. 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  $\Delta t_{ij}$ .

Робота алгоритму завершується, коли вже виконаний обліт всіх опорних точок кожного просторового коридору, а також відома довжина шляху кожного маршруту.

За розробленим методом можливо реалізувати механізм «самозагоєння» у межах суб-роїв в зграях дронів та перевизначення завдань підгруп як КФС у разі втрати декількох дронів під час критичного застосування. НМХ може бути корисною для того, щоб жоден вузол не був обстежений двічі.

У **четвертому розділі** наведені результати розроблення методів та засобів обміну даними між об'єктами рухомої моніторингової мережі. Визначено рівень зростання затримки у часі передачі даних від кількості ретрансляцій (рис. 17) при використанні БПЛА у якості трансферних вузлів при неперіодичних змінах з'єднань між різними парами КФО (рис. 18).

В роботі набув подальшого розвитку метод гарантованої доставки інформації між КФО з використанням трансферних вузлів та хмарних сервісів. При втраті працездатності GPS-модуля (в умовах великого електромагнітного опромінення у результаті застосування засобів радіоелектронної боротьби – створення «пухирів



РЕБ») група БПЛА повинна перейти від централізованого управління до автономного режиму.

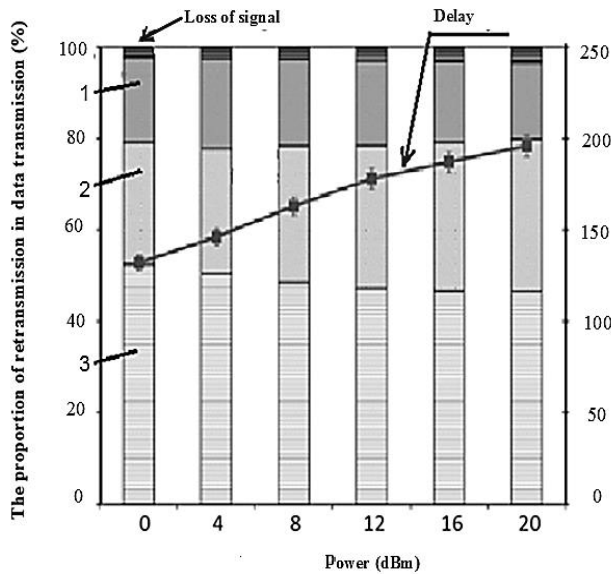


Рисунок 17 – Зростання затримки у часі передачі даних від кількості ретрансляцій: 1 – багаторазова ретрансляція; 2 – одноразова ретрансляція; 3 – без ретрансляцій

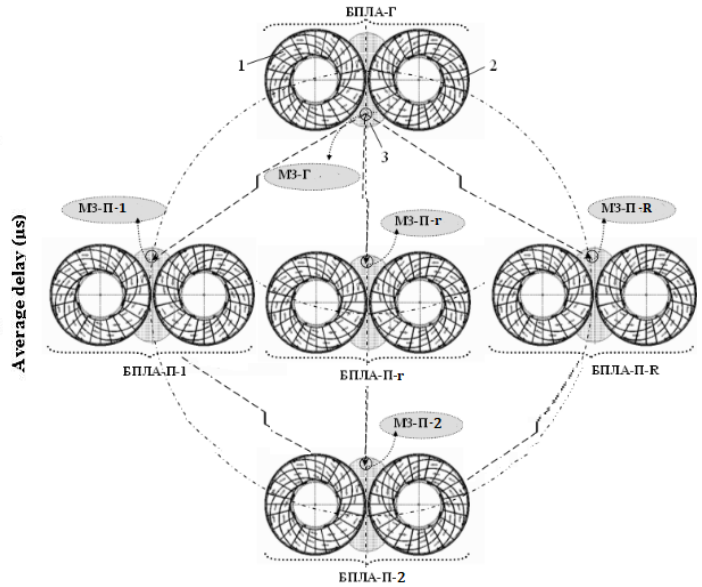


Рисунок 18 – Траєкторія передачі та трансферу (ретрансляції) даних у ШГКМ з рухомими КФО (вид зверху)

В такому разі функціонування ШГКМ при відсутності зв'язку між КФО можливо забезпечити за рахунок використання хмарного сервісу Google Firebase, на якому в сформованій «аудиторії» (рис. 19) зберігаються дані про останні координати всіх КФО до попадання в «пухир РЕБ» та нові точки маршруту, які передані на хмару від КЦ. Дрони, що потрапили в таких «пухир» та не передають власні координати до КЦ кожні 5 с, будуть знайдені іншими КФО зграї за допомогою їх власної системи стереозору. Нові координати для повернення у стрій будуть отримані кожним БПЛА зграї після відновлення зв'язку.

Така відкладена синхронізація може бути здійснена за рахунок зміни протоколу взаємодії між КФО шляхом додання параметрів режиму функціонування БПЛА та умов їх настання: А – автономний режим, Д – диференціальний, Е – апроксимація, N – недостовірні дані (рис. 20). Зазначений протокол взаємодії між КФО реалізується з врахуванням показників цілого набору пристроїв на борту БПЛА: акселерометра, барометра, гіроскопів, магнітографа, GPS-модуля, GSM-модуля тощо.

Необхідно зауважити, що використання даних у хмарних сховищах вимагає спеціальних заходів для захисту такої інформації. Задля підвищення рівня безпеки поточної інформації щодо функціонування БПЛА у разі перехоплення його сторонніми особами в дисертаційній роботі удосконалено метод підвищення криптостійкості передаваних повідомлень шляхом впровадження стеганографічного закриття GPS-координат БПЛА у відкриті дані.

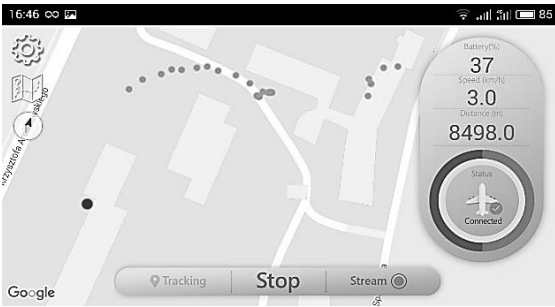


Рисунок 19 – «Аудиторія» Google Firebase, сформована за географічним принципом

```
>$GPRMC,170840.00,A,5445.33016,N,
1704.38950,E,1.6198,,310317,,A*7D
```

Рисунок 20 – Нотація протоколу взаємодії Клієнта з Об’єктом при зміні координат фінішу БПЛА

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 стегоконтейнер з GPS-координатами, розмір яких становить 128 бітів. Координати записуються у вигляді числа з плаваючою комою за стандартом IEEE 754 2008. Для реалізації методу у кожного значення вхідних даних забирається 8 молодших бітів під стегоконтейнер (рис. 21).

В процесі розроблення зазначеного методу були виявлені дві проблеми:

- 1) недостатній розмір стегоконтейнера (який дорівнює 64 біта);
- 2) недостатня захищеність даних при визначенні наявності стегоконтейнера.

Перша проблема вирішується шляхом поділу GPS-координат на 2 пакети по 64 біта і додаванням лічильника парності, за яким можна визначити, що GPS координати були отримані повністю. Спочатку передаються широта та довгота, потім швидкість пересування. Щоб зрозуміти, коли прийшли широта та довгота, а коли – швидкість, використовується лічильник парності (рис. 22). Якщо він парний, то прийшов перший пакет, інакше – другий.

Другу проблему запропоновано вирішувати за допомогою класичного методу стеганографії, удосконаленого шляхом додаткового кодування даних послідовністю випадкових чисел (рис. 23). 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.

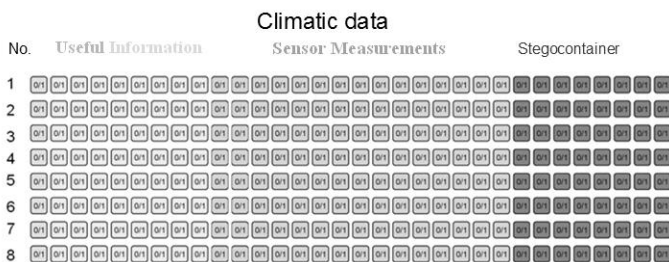


Рисунок 21 – Структура стегоконтейнера в кліматичних даних

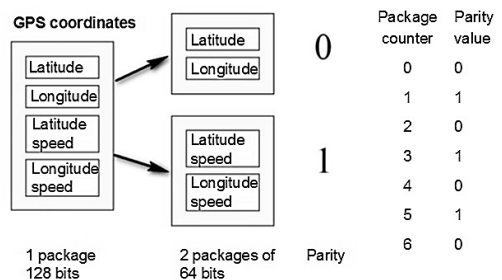


Рисунок 22 – Впровадження лічильника парності в пакет передачі GPS-координат

Слід зазначити, що 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.

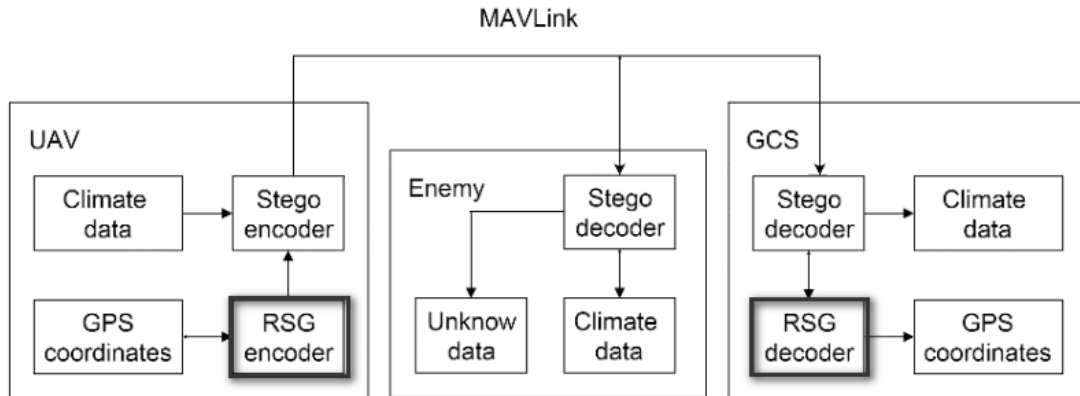


Рисунок 23 – Удосконалений метод стеганографії з додатковим кодуванням даних

Проведене натурне та комп'ютерне моделювання розробленої системи на основі двох апаратних рішень: мікроконтролера ATmega32 та плати STM32F429 Discovery. Визначений час повного циклу створення та обробки повідомлення у каналі зв'язку РММ в залежності від обраних комп'ютерних компонентів: на весь цикл обробки одного повідомлення витрачається час до 25 мс. Тоді, з урахуванням того, що GPS-координати передаються за 2 пакети, швидкість отримання GPS-координат дорівнює 20 разів на секунду. В реалізованому методі похибка значення становить  $3,04 \cdot 10^{-5} \%$ , що практично не впливає на коректність вхідних даних.

**П'ятий розділ** містить результати досліджень шляхів підвищення ефективності функціонування обчислювального процесора БПЛА за рахунок розподілу завдань між ядрами. Набула подальшого розвитку математична модель диспетчеризації завдань обчислювачів об'єктів ШГКМ з резервуванням ресурсів окремого ядра багатоядерного однокристального CPU для обчислень в першу чергу задач управління польотом. Показано, що прив'язка процесів до 3 ядер замість 4 на 15,7 % зменшує енергоспоживання БПЛА без суттєвого перегріву процесора у порівнянні з режимом виконання завдання за стандартним планувальником завдань ОС (табл. 2).

З урахуванням вищенаведеного алгоритму вивільнення окремого ядра CPU можливо енергію, акумульовану під час виконання  $i$ -го завдання, наприклад,  $PD$  – поліметричними датчиками, передавати до іншого КФО. Тоді модернізована математична модель диспетчеризації завдань між ядрами однокристального процесора набуває вигляду:

$$\left. \begin{cases} W_{iq}^{acc}(t_i) = \sum_{pd=1}^{PD} W_{pd}^{rec} \rightarrow \max, W_{iq}^{mod} \\ (x_{ij} W_{iq}^{acc}) \rightarrow \max, W_{iq}^{acc} \geq W_{iq}^{mod} \\ x_{ij} = 0, i\text{-th task isn't appoined to } j\text{-th CPU core,} \\ x_{ij} = 1, i\text{-th task is appoined to } j\text{-th CPU core.} \end{cases} \right\}, \quad (23)$$

де  $q = 1, \dots, z$  ( $z$  – кількість КФО у ШГКМ).

Таблиця 2 – Результати бенчмаркінгу за чотирма проектами

Показник	Розподіл завдань між ядрами CPU			
	№ 1 – стандартний	№ 2 – за технологією big.LITTLE	№ 3 – без багатопотоковості	№ 4 – запропонований
Час виконання завдання (Average)	12,7	24,6	47,2	16,5
Енергоспоживання (Average Power), Вт	58,5	38,9	27,3	49,3
Температура (Temperature), °C	75	62	62	80
Використання CPU (Utilization), %	100	56	31	77
Кількість обертів кулера на процесорі (Fan's number of rotations), RPM	1900	1560	1505	1599
Осцилограми завантаження CPU: середній показник (верхня осцилограма) та для кожного ядра (нижні 4 осцилограми)				

Застосування запропонованого підходу забезпечило підвищення ефективності використання процесора, дозволило зменшити коефіцієнт навантаженості CPU на 23 % для 4-ядерного процесора Qualcomm Snapdragon 400, на якому базуються сучасні моделі БПЛА.

Запропонований метод усунення дублювання виконання функцій БПЛА за рахунок розроблених засобів управління режимами роботи модулів БПЛА, а саме віддаленого відключення від енергоспоживання неперіоритетних пристроїв та/або ушкоджених функційних модулів на борту БПЛА одного суб-рою (рис. 24), дозволяє зменшити енерговитрати ШГКМ на 11,2 %.

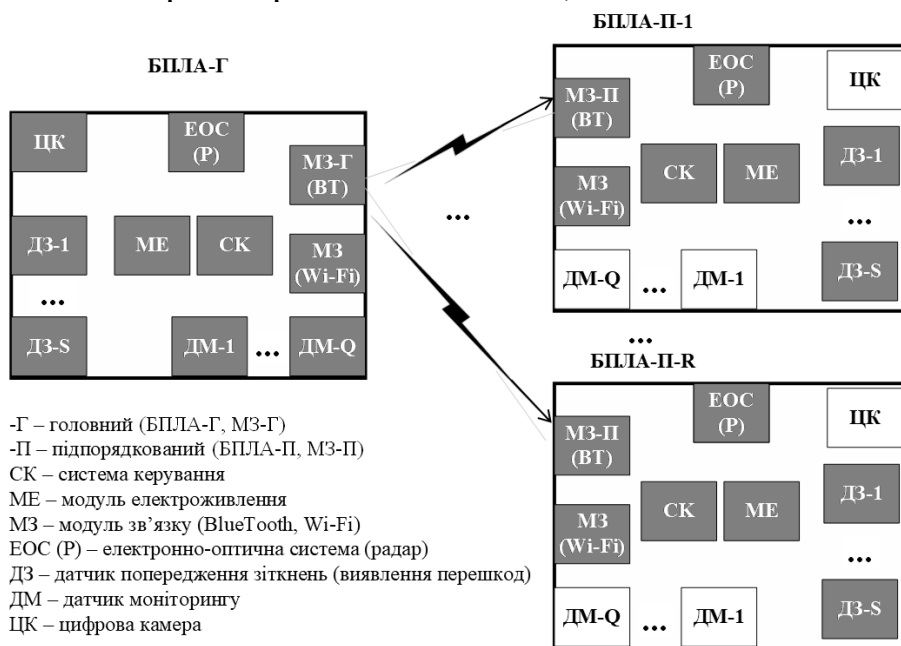


Рисунок 24 – Структурна схема взаємодії БПЛА в межах одного кластера з відключенням неперіоритетних пристроїв

В межах кластера головний БПЛА-Г та всі підлеглі БПЛА-П-Н обмінюються нейронною мапою з відміченими обстеженими точками місцевості. Інформація до командного центру (КЦ) про дії кожного кластера надсилається лише з БПЛА-Г  $p$ -го кластера. Для забезпечення постійного зв'язку в межах кластера контролюється відстань  $d_p$  між КЦ і головними вузлами БПЛА-Г кожного  $p$ -го кластера:

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{matrix} lat_{БПЛА-Г-p} \\ f_1(+\Sigma) \\ lat_{КЦ} \end{matrix} \right\} \rightarrow \langle\langle lat_{БПЛА-Г-p} - lat_{КЦ} \rangle\rangle \xrightarrow{f_1(\Sigma\Sigma)} \langle\langle (lat_{БПЛА-Г-p} - lat_{КЦ})^2 \rangle\rangle \\
 & \left. \begin{matrix} lon_{БПЛА-Г-p} \\ f_2(+\Sigma) \\ lon_{КЦ} \end{matrix} \right\} \rightarrow \langle\langle lon_{БПЛА-Г-p} - lon_{КЦ} \rangle\rangle \xrightarrow{f_2(\Sigma\Sigma)} \langle\langle (lon_{БПЛА-Г-p} - lon_{КЦ})^2 \rangle\rangle \\
 & \left. \begin{matrix} h_{БПЛА-Г-p} \\ f_3(\Sigma\Sigma) \\ h^2_{БПЛА-Г-p} \end{matrix} \right\} \rightarrow \langle\langle h^2_{БПЛА-Г-p} \rangle\rangle \\
 & \langle\langle (lon_{БПЛА-Г-p} - lon_{КЦ})^2 \rangle\rangle + \Sigma \langle\langle (h_{БПЛА-Г-p})^2 \rangle\rangle \rightarrow \langle\langle (lon_{БПЛА-Г-p} - lon_{КЦ})^2 + (h_{БПЛА-Г-p})^2 \rangle\rangle \\
 & \langle\langle (lon_{БПЛА-Г-p} - lon_{КЦ})^2 + (h_{БПЛА-Г-p})^2 \rangle\rangle \xrightarrow{f_4(+\Sigma)} f_1(\sqrt{+\Sigma}) \rightarrow d_p
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

В роботі набув подальшого розвитку метод бездротового передавання зекономленої енергії між об'єктами РММ за технологією PoWiFi. Слід зазначити, що використання PoWiFi може привести до істотного зростання внутрішньої інтерференції і загального зниження пропускної здатності мережі Wi-Fi. Тому для відправки енергетичних фреймів з метою акумулювання енергії на інших об'єктах ШГКМ в роботі передбачено використовувати інші частотні канали, а не той самий, на якому здійснюється передача даних. Також передавати додаткові «енергетичні пакети» слід в інші проміжки часу, коли інформація не передається.

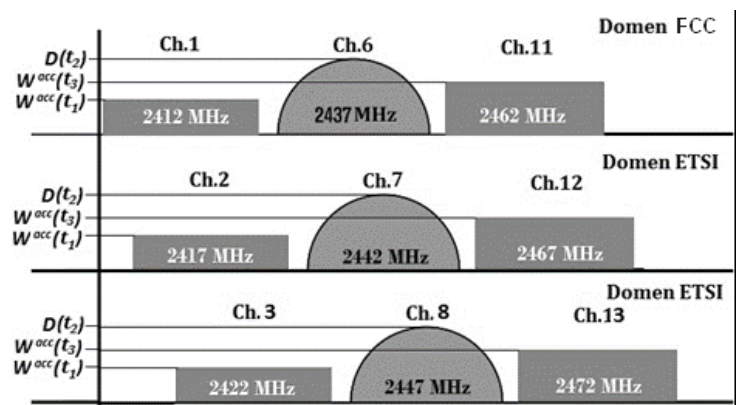


Рисунок 25 – Розподіл функцій передачі даних та енергетичних фреймів між каналами, що не пересікаються у діапазоні 2,4 ГГц

Для реалізації зазначеного метода розроблена циклограма, за якою забезпечується чергування інтервалів передачі даних та передавання енергії з використанням різних груп Wi-Fi-каналів, що не перетинаються (рис. 25). Процедура передавання енергії деталізована для домену FCC (США) з підтримкою 11 частотних каналів технології Wi-Fi, та для європейського домену ETSI з підтримкою 13 частотних каналів. Такий підхід дозволяє збільшити час життя ШГКМ, в яких для зв'язку між КФО використовується різномірне активне Wi-Fi-обладнання.

Такий підхід дозволяє збільшити час життя ШГКМ, в яких для зв'язку між КФО використовується різномірне активне Wi-Fi-обладнання.

Для реалізації модифікованого методу бездротового передавання енергії між WiFi-компонентами об'єктів ШГКМ на основі технології PoWiFi розроблена процедура (рис. 26), за якою дані та енергія передаватиметься на каналах, що не пересікаються, та у різні проміжки часу.

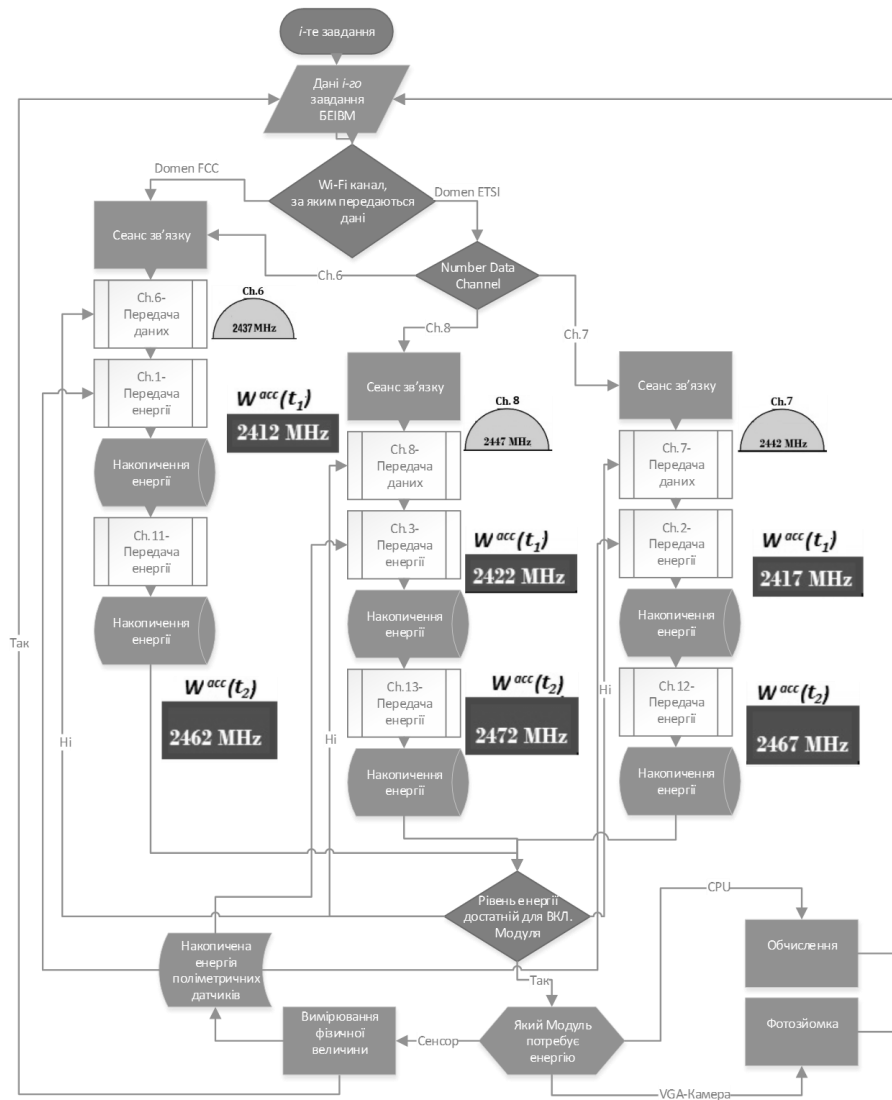


Рисунок 26 – Процедура розподілу за каналами та часом передачі даних і енергетичних фреймів через Wi-Fi

Як показано на рис. 26, енергетичні фрейми в такому випадку можна передавати по двом іншим непересічним каналам 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 циклограмою передуює 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  $W^{acc}(t_1)$ . До 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. 26 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).

У запропонованій модифікації бездротового методу передавання також передбачено, що модулі ШГKM, 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.

У **шостому розділі** наведені розроблені прикладні рішення застосування розроблених у дисертаційній роботі теоретичних основ, методів та засобів створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування.

Розроблена структура локальної ШГKM для за допомогою мобільних первинних реєстраторів.

Для розгортання ШГKM на контейнеровозі запропоновано за допомогою БПЛА доставити та розмістити на даху контейнера у кожній секції ряду на палубі, найближчого до причалу, мобільний пристрій на ОС Android, який реєструє контейнер, коли стріла портокрана переносить його над фотокамерою девайса-реєстратора (рис. 27).

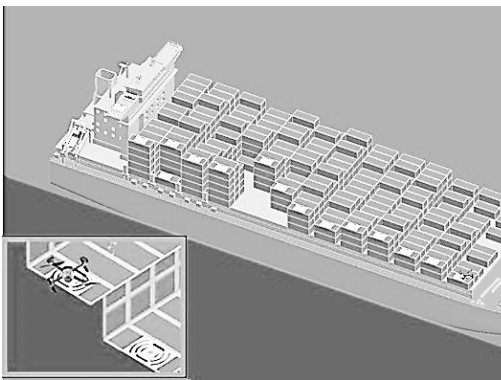


Рисунок 27 – Загальний вигляд судна-контейнеровоза з Wi-Fi-реєстраторами

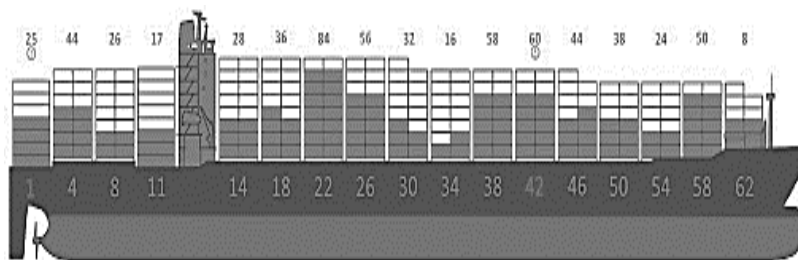


Рисунок 28 – Загальний вигляд графічного інтерфейсу на пристрої капітана із зазначенням кількості контейнерів у кожній секції бау-плану

Параметри фотокамер мобільних пристроїв налаштовуються 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. 28).

Теоретичні та практичні результати розробки методу реєстрації великорозмірних вантажів контейнерного типу використано і впроваджено на контейнеровозі «CSCL Uranus» (zareєстрований у Hong Kong) для створення комп'ютерної системи інформування капітана судна щодо кількості контейнерів у кожній секції, перенесених через борт контейнеровоза портокраном.

Використання КС на основі РММ дозволяє значно скоротити час виявлення і відновлення несучої здатності ділянок трубопроводів теплотрас з локальними пошкодженнями. Розроблена КС базується або на основі пірометра, або на основі датчиків температури з бездротовою передачею вимірянних температур до узагальнюючого пристрою. У будь-якому випадку такі датчики встановлюються на дрон (рис. 29).

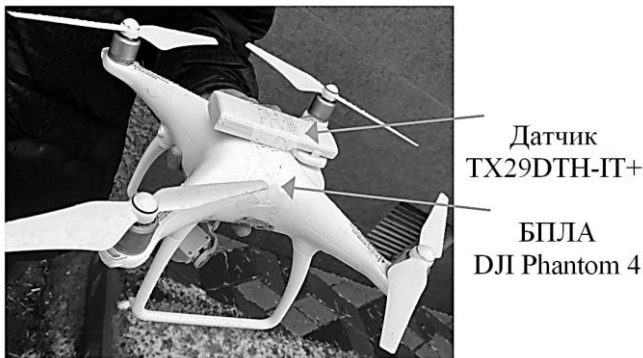


Рисунок 29 – Квадрокоптер DJI Phantom 4 з теплодатчиком TX29DTH-IT на борту

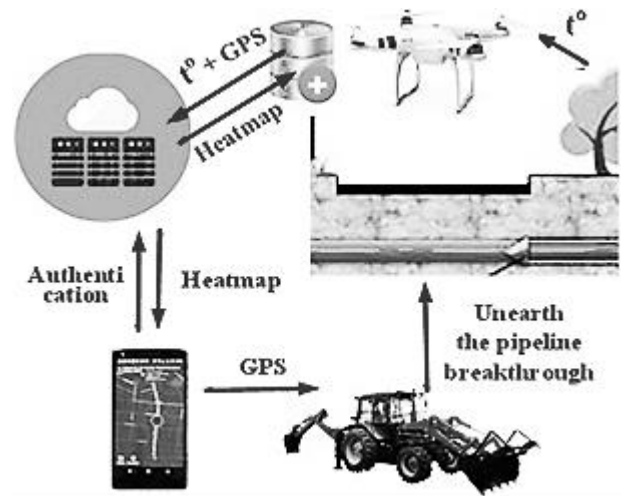


Рисунок 30 – Процедура пошуку прихованих місць витoku теплової енергії за допомогою об'єкта ШГКМ

На відміну від 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; одночасне опрацювання даних 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 розділі 4. Потім виміряні дані наносяться на мапу місцевості як значення або як тепла карта та відображають місце витoku теплової енергії на теплотрасі (рис. 30).

Розроблена інформаційно-вимірювальної КС була використана департаментом житлово-комунального господарства (ЖКГ) Миколаївської міської ради та відповідними підприємствами ЖКГ м. Миколаєва для виявлення місць енерговитрат на міській 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.

Для подовження часу життя ШГКМ розроблені конструктивні рішення перспективних моделей БПЛА з більш економним витрачанням заряду акумуляторів під час формування підйомної сили БПЛА.

Запропоновано створювати окремі суб-рої БПЛА шляхом з'єднання двох корпусів БПЛА  $f_1(\text{CorpsБПЛА})$  и  $f_2(\text{CorpsБПЛА})$  або тріади БПЛА в єдину жорстку моноконструкцію (рис. 31). В кожному з БПЛА розташовують систему управління СУ, модуль електроживлення МЕ, модуль зв'язку МЗ (BlueTooth, Wi-Fi, RF тощо), – електронно-оптична система ЕОС та радар Р, – датчик попередження зіткнень (виявлення перешкод) ДЗ, – датчик моніторингу ДМ, ЦК – цифрову камеру (рис. 32), необхідні комп'ютерні компоненти для організації спостереження за наземними об'єктами з наступним визначенням їх координат, обробки отриманих даних і передачею їх на головний БПЛА або наземний КЦ.

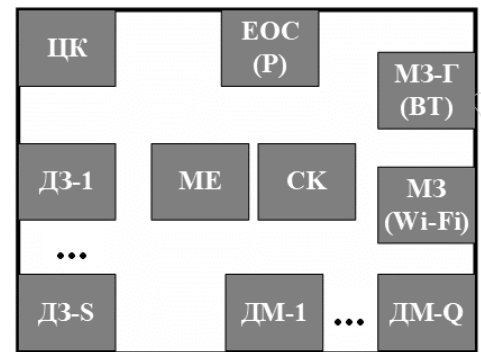
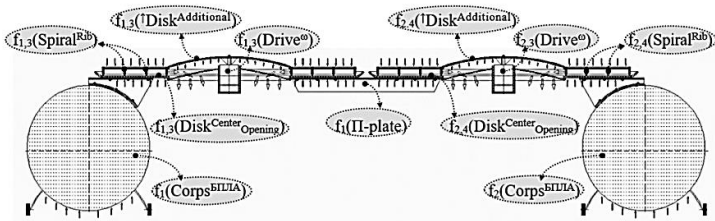


Рисунок 31 – Суб-рій у вигляді моноконструкції зі спарених БПЛА (вид збоку)

Рисунок 32 – Обладнання на борту кожного БПЛА для РММ

У конструкцію БПЛА впроваджена підсистема катапультивання блоків пам'яті та визначення GPS-координат БПЛА, яка активується при критичному застосуванні БПЛА та здійснює відстріл зазначених модулів задля непопадання до конкурентних осіб з оповіщенням КЦ про координати падіння зазначеного модуля.

Розроблені рішення захищені патентами України на корисну модель. Детально розроблені прикладні рішення з використанням ШГКМ описані в авторській монографії на ресурсі Amazon за посиланням <https://www.amazon.com/Heterogeneous-computer-networks-critical-application/dp/6139863570>.

У **висновках** перелічені основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження із зазначенням чисельних показників, що доводять перевагу отриманих результатів у порівнянні з існуючими у галузі.

У **додатках** наведені акти впровадження результатів роботи в поточній діяльності підприємств різних галузей (використання ШГКМ при розвантаженні/завантаженні суден-контейнеровозів, при пошуку місць аварійного

витоку теплоносіїв та міських теплотрасах, при організації захищеного обліку повідомленнями у розгалуженій складській системі), а також у НДР та навчальному процесі ЧНУ ім. Петра Могили. Також наведені технічні характеристики використаних систем та компонентів, лістинги програмних кодів для організації взаємодії об'єктів ШГKM на апаратному рівні, лістинг розробленого програмного застосунку та результати моделювання руху БПЛА у середовищі MATLAB, копії сертифікатів участі у Міжнародних програмах, список праць за темою дисертації.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну проблему підвищення ефективності функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж (ШГKM) критичного застосування на базі безпілотних апаратів (БПЛА). 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 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 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 ШГKM 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 Брамагупти 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. 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 чотирядерного 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.

10. 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.

11. 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.

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

13. 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); при виконанні науково-дослідних робіт, 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.

Більшість отриманих результатів може бути розповсюджено на БПА, що пересуваються в іншому, не повітряному, середовищі.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

### *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.

2. Журавська І. М. Гетерогенні комп'ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БПЛА. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. П. Могили, 2019. 192 с.

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 : Proc. of SPIE – Int. Society for Optics and Photonics, Poland*. 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, P. 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*. 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 однокристалного процесора. *Наукові праці* / Чорном. нац. ун-т ім. П. Могили. 2017. Т. 308. Вип. 296. С. 77–82. **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. П. Могили. Миколаїв, 2017. Т. 307, Вип. 295. С. 42–46. **Index Copernicus**.

13. Журавська І. М. Забезпечення стабільного бездротового зв'язку у кіберфізичній системі з рухомими об'єктами. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 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*. 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* / 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*. 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.* 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*. 2016. № 1. С. 20–27.

22. 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*. 2015. Т. 266, Вип. 254. С. 112–118.

23. Фісун М. Т., Журавська І. М., Горбань Г. В. Інтеграція даних мережевого трафіку мультисервісної корпоративної мережі з класами постріляційної СКБД Caché. *Наукові праці / Чорном. держ. ун-т ім. Петра Могили*. 2011. Т. 173, Вип. 161. С. 105–110.

24. Журавская И. Н., Назарова Н. С. Определение эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции двухобмоточного трансформатора. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий*. 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*. 1995. Вып. 2. С. 107–110.

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 Proc. Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)* : Proc. of the 2nd Int. Workshop, Zaporizhzhia, Ukraine, April 15–19, 2019. Vol. 2353. P. 350–364. **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)* : Proc. of the 4th IEEE Int. Symp., Lviv, Ukraine, Sept. 20–21, 2018. P. 98–102. 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)* : Proc. of the 8th IEEE Int. Conf., Bucharest, Romania, Sept. 21–23, 2017. Vol. 1. P. 215–221. 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)* . Proc. of the IEEE 1st Int. Sc. and Techn. Conf., Lviv (vil. Stare Selo), August 23–27, 2016. P. 177–181. 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)* : Proc. of the 2016 IEEE 36th Int. Conf., Kyiv, Ukraine, April 19–21, 2016. P. 382–387. 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. Sc.-Pract. Conf., London, UK, Dec. 11–12, 2014. P. 30–32. DOI: 10.5281/zenodo.14090. **Zenodo – CERN**.

35. Zhuravska I. M., Lavrynenko S. V. Implementation the monitoring CPU loading application for mobile devices. *Information technology and interactions (IT&T-2017)* : Proc. of the 4th Int. Sc. Conf., Kyiv, Ukraine, Nov. 8–10, 2017 / Taras Shevchenko Nat. Univ. 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 Nat. Univ. of Kyiv. P. 68.

37. 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* : Papers of the 5th Int. Sc. Conf., Stuttgart, Germany, March 24, 2014. P. 30–32.

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 листоп. 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* : тези XII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Миколаїв, 7-10 червня 2018 р. 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 листоп. 2017 р. / Військ. ін-т Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. 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., Костиця 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 листоп. 2017 р. Миколаїв : Вид-во ЧНУ 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* : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13–17 листоп. 2017 р. Миколаїв : Вид-во ЧНУ 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* : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13–17 листоп. 2017 р. Миколаїв : Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2017. С. 32–34.

45. Журавська І. М., Залюбовський М. В., Мільшин А. С. Автоматизована система обліку великих вантажів з реєстраторами на базі мобільних пристроїв. *Могілянські читання* : тези доп. XX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 13-17 листоп. 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* : 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. / Центральноукр. 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*: тези доп. XI Міжнар. наук.-практ. конф., Миколаїв, 8–11 червня 2017 р. Миколаїв: Вид-во Чорном. нац. ун-ту 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*: тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф., Миколаїв, 16–17 лютого 2016 р. Миколаїв: Вид-во Чорном. нац. ун-ту 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*: тези доп. XIX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 14–18 листоп. 2016 р. Миколаїв: Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2016. С. 24–26.

55. Журавська І. М., Олійник В. В. Підсистема катапультивання та визначення GPS-координат блоків БПЛА при критичному застосуванні. *Могілянські читання*: тези доп. XIX Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 14–18 листоп. 2016 р. Миколаїв: Вид-во Чорном. нац. ун-ту ім. Петра Могили, 2016. 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. Вінниця: Вид-во Вінниц. нац. політехн. ун-ту, 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. 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. 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. Вінниця : Вид-во Вінниц. нац. політехн. ун-ту, 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 (KICM – 2016)* : тези доп. IX Всеукр. наук.-практ. конф., Кривий Ріг, 22–24 березня 2016 р. 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 листоп. 2015 р. 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* : тези доп. XVIII Всеукр. наук.-метод. конф. Миколаїв, 12–20 листопада 2015 р. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. П. Могили, 2015. С. 113–115.

63. Журавська І. М., Собко Д. А., Салтан Б. А. Аналіз захищеності Wi-Fi та механізми розбудови безпечної мережі. *Могілянські читання* : тези доп. XVIII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 12–20 листоп. 2015 р. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. П. Могили, 2015. 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 : 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* : тези доп. XVIII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 12-20 листопада 2015 р. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. П. Могили, 2015. С. 78–79.

66. Журавская И. Н., Щебетюк 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. Харків : Вид-во Харк. нац. ун-ту будівництва та архітектури ХНУБА, 2015. С. 36.

67. Журавська І. М., Попель М. І. Автоматизація фармацевтичного складу з використанням спеціалізованих роботів, дистанційного клімат-контролю та відеоспостереження. *Могилянські читання* : тези доп. XVII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 17–21 листопада 2014 р. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. П. 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. *Могилянські читання* : тези доп. XVII Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 17–21 листоп. 2014 р. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. П. 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. Одеса : Вид-во Одес. нац. морський ун-ту, 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. Миколаїв : Вид-во Нац. ун-ту кораблебудування, 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. Київ : Вид-во Нац. авіац. ун-ту, 2012. С. 129.

72. Єрьомін 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. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. П. 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. Київ : Вид-во Нац. авіац. ун-ту, 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. Миколаїв, 2015. Т. 266, Вип. 254. С. 97–104.

77. Журавська І. М. Проектування комп'ютерних мереж. Локальні мережі : навч.-метод. посібник. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. 124 с.

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. Пусев. № 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. Пусев, 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. Пусев, І. М. Журавська, Л. М. Мірошніченко, В. М. Рябенський. № 93300894 ; заявл. 16.03.93 ; опубл. 26.12.94, Бюл. № 5-І.

## АНОТАЦІЯ

**Журавська І. М. Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування.** – 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.

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

У роботі удосконалений метод моделювання траєкторії руху безпілотних апаратів (БПЛА) на основі стохастичних диференціальних рівнянь Ланжевена, що надає можливість прогнозувати поведінку групи (зграї, рою) БПЛА з урахуванням зовнішніх збурень на подібну броунівського руху. Для визначення траєкторії БПЛА застосовано теоретичні засади «прогулянок Лєві» та «польотів Лєві» для біологічних систем, а також фінансова модель Блека-Шоулза, що дозволило уточнити паспортний час роботи БПЛА 1-го класу в залежності від умов експлуатації та попередити втрату дронів через несвоєчасне їх повернення на базу

для підзарядки. Розбиття гетерогенної комп'ютерної системи БПЛА на суб-рої та розроблення методу синтезу суб-оптимальних маршрутів суб-роїв БПЛА на основі нейронної мережі Хопфілда дозволяє уникнути дублювання виконання завдань у будь-яких точках території. Набув подальшого розвитку метод гарантованої доставки інформації між кіберфізичними об'єктами (КФО) ШГКМ шляхом використання трансферних вузлів та хмарних сервісів, а також стеганографічного закриття GPS-координат БПЛА у дані, які передаються відкритими каналами зв'язку. Набула подальшого розвитку математична модель диспетчеризації завдань між ядрами обчислювачів об'єктів ШГКМ з обмеженими енергоресурсами. Розроблені засоби управління режимами роботи модулів БПЛА в межах одного суб-рою, що дозволяє економити енергію батареї БПЛА. Набув подальшого розвитку метод бездротового передавання енергії між КФО на основі технології PoWiFi за рахунок чергування інтервалів передачі даних та передавання енергії. Більшість отриманих результатів може бути розповсюджено на безпілотні апарати, що пересуваються в іншому, не повітряному, середовищі.

**Ключові слова:** кіберфізична система, швидкодинамічна гетерогенна комп'ютерна мережа, безпілотний літальний апарат, довжина траєкторії, рівняння Ланжевена, прогулянка Ліві, суб-оптимальний маршрут, нейронна мережа Хопфілда, стегоконтейнер, 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.** – 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 thesis is aimed at solving the actual scientific and technical problem of developing theoretical foundations of construction and practical use of modern fast-dynamic heterogeneous computer networks (FHCN) for critical application.

The method of modeling the trajectory of unmanned vehicle 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 lifetime of critical application FHCN was developed by calculating the total trajectory of UAV movement using the theoretical principles of "Lévy walks" and "Lévy flights" for

biological systems. This made it possible to specify the passport operating time for UAV of Class 1, depending on the terms of use. This approach can prevent the crash of drones due to the untimely return of them to the base for recharging. The high degree of algorithmization of the used graph-analytic UAV's 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. The method based on the Brahmagupta's quadrilateral for determining the UAV flock function area taking into account changes in the flock's topology has developed. This method provides an opportunity to calculate the percentage of the under-scorched area by taking into account the greater accumulation of the flock than the Brahmagupta rectangle due to the need for reliable data exchange between the UAVs. The method of dividing a heterogeneous UAVs' computer system 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. It has allowed accelerating the inspection of the territory with the help of 6 UAVs by 11.6%. The method of synthesis of sub-optimal routes of UAV sub-swarms with the help of the Hopfield neural network (HNN) has proposed. The implementation of the self-healing mechanism within a flock of drones was also considered. The redefinition of tasks of sub-swarms as cyber-physical systems (CFS) in the event of loss of several drones during the critical application was also considered. The method of guaranteed delivery of information between cyber-physical objects (CPO) through the use of transfer nodes and cloud services (on the example of Google FireBase) further elaborated. As a direct result of this, the security of the transmitting data about UAV flock location improves significantly in case of interception of the object by third parties. The method of increasing the cryptosecurity of transmitted messages via steganographic closure of the GPS coordinates of the UAV into open data transmitted using the MAVLink protocol by open communication channels has improved. A mathematical model for dispatching the tasks of the calculators of objects with limited energy resources was further developed. It has allowed developing 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 heavy factor by 23% for the quad-core processors, being used on modern UAV models. The method of avoiding duplication of technological function executing by UAV at the expense of the developed means of controls modes of UAV operation is offered. This is done at the expense of remotely wireless disabling non-priority devices and/or damaged modules on UAV board within single sub-swarm. An algorithm for the process of additional charge-up of UAV accumulators due to wireless transmission of energy between CPOs has elaborated. The wireless power transmission method was further developed using PoWiFi technology. It occurs in line with the created cyclorama, which provides alternation of data and energy intervals. In the process, different groups of non-intersecting Wi-Fi channels according to the rules of the FCC domains and ETSI are used. Most of the results can be extended to unmanned vehicles, which move in a different, not air, environment.

**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.

Підп. до друку 28.08.2019  
Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офсет.  
Гарнітура «Times New Roman». Друк ризограф.  
Ум. друк. арк. 1,9. Тираж 100 пр. Зам. № 5823

Видавець і виготовлювач: ЧНУ ім. Петра Могили.  
вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, 54003.  
Тел.: (0512) 50-03-32, (0512) 76-55-81, e-mail: rector@chmnu.edu.ua.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6124 від 05.04.2018.

