

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ”
ФАКУЛЬТЕТ КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК ТА ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач випускової кафедри

_____ Юрій ІСКРЕНКО

“ _____ ” _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ “МАГІСТР”
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 123 “КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ”

Тема: Інтелектуальна підсистема управління роєм БПЛА

Виконавець: Павло МОГИЛЬНИЙ

Керівник: Микола ГУЗІЙ

Нормоконтролер: Наталія ФОМІНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ”
ФАКУЛЬТЕТ КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК ТА ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КСМ

_____ Юрій ІСКРЕНКО

” _____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

_____ Могильного Павла Юрійовича _____

1. Тема роботи: Інтелектуальна підсистема управління роєм БПЛА

Затверджена наказом ректора від “ 24 ” жовтня 2025 р. №2344/ст

2. Термін виконання роботи: з 29.09.2025 по 31.12.2025

3. Вихідні дані до роботи: мова програмування Python, бібліотека NumPy, бібліотека NetworkX, бібліотека Matplotlib, бібліотека Pandas.

4. Зміст пояснювальної записки:

Вступ, технології координації роїв БПЛА в FANET, методи та моделі функціонування інтелектуальної підсистеми управління роєм БПЛА, розробка прототипу гібридної системи FANET, дослідження прототипу гібридної системи FANET, висновки, список бібліографічних посилань використаних джерел.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:

Представлення результатів роботи у вигляді презентації.

6. Календарний план

№ п/п	Завдання	Термін виконання етапів	Підпис керівника
1.	Затвердження теми роботи	29.09.2025	
2.	Аналіз літератури та існуючих підходів, представлення керівнику	30.09.2025	
3.	Постановка задачі, представлення керівнику	03.10.2025	
4.	Аналіз методів та моделей функціонування, представлення керівнику	11.10.2025	
5.	Розробка прототипу гібридної системи, представлення керівнику	20.10.2025	
6.	Дослідження прототипу гібридної системи, представлення керівнику	06.11.2025	
7.	Оформлення пояснювальної записки	25.11.2025	
8.	Оформлення вступу	26.11.2025	
9.	Оформлення основної частини, представлення керівнику	28.11.2025	
10.	Оформлення презентації, представлення керівнику	07.12.2025	
11.	Завершення роботи та підготовка до захисту	14.12.2025	
12.	Захист роботи	23.12.2025– 31.12.2025	

7. Дата видачі завдання: “29” вересня 2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи: Микола ГУЗІЙ _____
(підпис керівника)

Завдання прийняв до виконання: Павло МОГИЛЬНИЙ _____
(підпис виконавця)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи “Інтелектуальна підсистема управління роєм БПЛА”: 85 сторінок, 25 рисунків, 5 таблиць, 35 літературних джерел.

Об’єкт дослідження – інтелектуальні системи управління роєм БПЛА.

Предмет дослідження – технології гібридної маршрутизації *FANET*.

Мета роботи – розробка інтелектуальної підсистеми управління роєм БПЛА.

Технічні та програмні засоби – мова програмування *Python*, бібліотека *NumPy*, бібліотека *NetworkX*, бібліотека *Matplotlib*, бібліотека *Pandas*.

Основні характеристики та показники – коефіцієнт доставки пакетів, середня затримка передачі, середня кількість переходів, рівень залишкової енергії вузлів та масштабованість мережі в умовах високої мобільності *FANET*.

Отримані результати та їх новизна – розроблено та досліджено адаптивний гібридний підхід до маршрутизації у *FANET*, який поєднує проактивні та реактивні механізми залежно від динаміки топології, що дозволяє підвищити коефіцієнт доставки пакетів і зменшити енергоспоживання у порівнянні з класичними протоколами.

Рекомендації щодо використання результатів – запропонована система може використовуватися в задачах колективного управління БПЛА, а саме у прикордонному моніторингу та нагляді, пошуково-рятувальних операціях, військових застосуваннях для організації стійкого мережевого зв’язку, для побудови прототипів інтелектуальних роїв, у навчальних симуляторах *FANET*.

FANET, РІЙ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ, ГІБРИДНА МАРШРУТИЗАЦІЯ, *OLSR*, *AODV*, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ДИНАМІЧНА ТОПОЛОГІЯ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЇ КООРДИНАЦІЇ РОЇВ БПЛА В <i>FANET</i>	13
1.1 Проблема координації та нестабільності мереж.....	13
1.2 Аналіз протоколів маршрутизації.....	20
1.3 Постановка задачі.....	25
Висновки до розділу	30
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДСИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РОЄМ БПЛА.....	32
2.1 Моделі та топології в <i>FANET</i>	32
2.2 Гібридні алгоритми маршрутизації <i>FANET</i>	39
2.3 Методи прийняття рішень у децентралізованих мережах	42
Висновки до розділу	46
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ПРОТОТИПУ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ <i>FANET</i>	48
3.1 Архітектура гібридної системи маршрутизації	48
3.2 Алгоритм функціонування інтелектуальної підсистеми управління роєм БПЛА	51
3.3 Сценарії моделювання та умови проведення експериментів	54
3.4 Метрики оцінювання підсистеми гібридної маршрутизації	56
3.5 Реалізація підсистеми	58
Висновки до розділу	63
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОТОТИПУ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ <i>FANET</i>.....	64
4.1 Методика проведення експериментальних досліджень	64

4.2 Аналіз результатів моделювання у вибраних сценаріях <i>FANET</i>	65
4.3 Практичні аспекти реалізації <i>rule-based</i> маршрутизації в реальних <i>FANET</i>	73
Висновки до розділу	76
ВИСНОВКИ	78
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81
Додаток А	86
Додаток Б	87
Додаток В	89

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

<i>AODV</i>	–	<i>Ad hoc On-Demand Distance Vector</i> (реактивний протокол маршрутизації за вимогою)
<i>ACO</i>	–	<i>Ant Colony Optimization</i> (біоінспірований алгоритм оптимізації мурашиної колонії)
<i>DSR</i>	–	<i>Dynamic Source Routing</i> (реактивний протокол маршрутизації з повним шляхом у пакеті)
<i>FANET</i>	–	<i>Flying Ad Hoc Network</i> (літаюча <i>ad-hoc</i> мережа безпілотних літальних апаратів)
<i>MAC</i>	–	<i>Medium Access Control</i> (каналний рівень керування доступом до середовища)
<i>MANET</i>	–	<i>Mobile Ad Hoc Network</i> (мобільна <i>ad-hoc</i> мережа)
<i>MPR</i>	–	<i>Multipoint Relay</i> (вузол-ретранслятор у протоколі <i>OLSR</i>)
<i>OLSR</i>	–	<i>Optimized Link State Routing</i> (проактивний протокол маршрутизації зі зменшеним службовим трафіком)
<i>PHY</i>	–	<i>Physical Layer</i> (фізичний рівень моделі <i>OSI</i>)
<i>PDR</i>	–	<i>Packet Delivery Ratio</i> (коефіцієнт доставки пакетів)
<i>RREP</i>	–	<i>Route Reply</i> (повідомлення відповіді маршруту в <i>AODV</i>)
<i>RREQ</i>	–	<i>Route Request</i> (повідомлення запиту маршруту в <i>AODV</i>)
<i>U2U</i>	–	<i>UAV-to-UAV</i> (зв'язок “БПЛА–БПЛА”)
<i>UAV</i>	–	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> (безпілотний літальний апарат)
<i>VANET</i>	–	<i>Vehicular Ad Hoc Network</i> (<i>ad-hoc</i> мережа транспортних засобів)
БПЛА	–	Безпілотний літальний апарат

ВСТУП

Протягом останніх десяти років, розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) значно змінив підходи в організації автономних систем спостереження, пошуку, логістичних операцій, військового застосування. Перехід від одиничних БПЛА до групової роботи у режимі рою відкрив нові можливості, проте каталізувало достатню кількість складних інженерних та дослідницьких проблем. Один з ключових компонентів подібних систем надійний, розширений та енергоефективний зв'язок між апаратами, що реалізуються через мережу *FANET*, яка є літаючою *ad-hoc* мережою.

На відміну від звичайних мереж *ad-hoc*, *MANET* або *VANET*, *FANET* має набагато вищу швидкість переміщення елементів, тривимірний рух, непередбачувані радіо канали та зміну щільності мережі, що робить підтримання стабільних з'єднань між вузлами досить складним. Умови руху БПЛА часто призводить до розривів у каналах, поділ компонентів з'єднання на фрагменти та зменшення часу життя маршрутів. Саме тому розробка ефективних алгоритмів маршрутизації для *FANET* є важливою наукоємною темою у різних сферах застосування.

Попри швидкий розвиток досліджень у галузі бездротових мереж, наявні протоколи маршрутизації мають низку проблем, особливо, в умовах високої швидкості компонентів системи і мережеве компонування є досить непередбачуваним. Проактивні протоколи на зразок *OLSR* мають невелику затримку у маршрутизації, але вони створюють додаткові навантаження на мережу і втрачають ефективність при частих розривах зв'язків. Реактивні ж протоколи на зразок *AODV* більш гнучкі до змін, але вони мають значні затримки у пошуку маршрутів і можуть бути нестабільними в роз'єднаних топологіях. Отже, жоден із класичних способів не може повністю задовольнити потреби *FANET* у всіх режимах роботи.

У реалістичних сценаріях роботи роїв БПЛА забезпечення мережевої зв'язаності ускладнюється такими факторами, як нерівномірний розподіл апаратів у просторі, різкі зміни швидкості та напрямку руху, неоднорідність радіочастотного середовища, а також обмежений енергетичний ресурс кожного окремого дрона. Через це мережа може миттєво переходити від повністю зв'язного стану до фрагментованого або навіть повністю розірваного, що створює серйозні проблеми для безперервної передачі даних. У складних сценаріях, наприклад під час обходу перешкод, виконання маневрів чи польоту у змінних погодних умовах, *FANET* може втрачати стабільність на значний час, унаслідок чого класичні протоколи маршрутизації перестають працювати належним чином.

Окрему проблему становлять сценарії з низькою щільністю дронів, коли мережа існує на межі зв'язності. У таких умовах будь-який протокол, що вимагає багатоетапної комунікації, швидко втрачає ефективність. З іншого боку, сценарії з великою кількістю БПЛА й невеликим простором моделювання формують надмірно щільну топологію, у якій важливо уникати перевантаження таблиць маршрутизації та збільшення витрат енергії. Це означає, що *FANET* не має єдиного “універсального режиму” а зміна умов роботи повинна автоматично впливати на вибір алгоритму маршрутизації.

Внаслідок описаних дефектів виникає потреба у гібридних системах, що поєднують найкращі частини проактивних та реактивних методів, але багато сучасних є складними в реалізації і вимагають значну кількість обчислювальних ресурсів. У контексті БПЛА, це призводить до нових проблем, оскільки апарати мають обмежену обчислювальну потужність і мають значні енергетичні обмеження. Отже, головний виклик – створити більш прямолінійну та надійну гібридну систему маршрутизації, яка не покладається на складні обчислення, але може пристосуватися до різних мережевих умов.

У кваліфікаційній роботі такою системою є *rule-based* гібридний маршрутизатор, який виконує переключення між *OLSR* і *AODV*, тримаючись деяких досить строгих вказівок на зразок того наскільки стабільною є

налаштування мережі, швидкість зв'язків, скільки сусідів поряд, і скільки залишилось енергії. На відміну від алгоритмів з високою обчислювальною складністю, підхід заснований на правилах, характеризується низькою ресурсоемністю, легкістю в інтерпретації, що робить його потенційно ефективним в реальних системах БПЛА.

Враховуючи постійно мінливу природу *FANET*, є необхідність не просто теоретично обґрунтувати алгоритм маршрутизації, а й створити симуляційний прототип, який здатний перевірити його поведінку в різних сценаріях. Тому у роботі розроблено спеціальне середовище на основі мови програмування *Python* та окремих бібліотек для симуляції руху БПЛА, побудови мережевих графів зв'язності, оцінки ефективності, а головне – верифікує вплив запропонованого алгоритму на якість передачі даних у порівнянні з “чистими” *OLSR* та *AODV*.

Відсутність однозначної найкращої стратегії маршрутизації при різних сценаріях роботи *FANET* робить дослідження актуальним для сфери безпілотних систем, оборонних технологій, логістики, аграрного сектору та інших областей. Запропонований прототип дозволяє дослідити, яким чином правила перемикання між *OLSR* та *AODV* впливають на *PDR*, топологічну складність маршрутів і енергоспоживання вузлів під час моделювання трьох різних мережевих режимів – стабільного, нестабільного та деградованого.

Дослідження, виконане в рамках роботи, спрямоване на створення доступного та відтворюваного інструменту аналізу маршрутизації в роях дронів, на обґрунтування вибору алгоритмічних підходів, що можуть застосовуватися в реальних умовах. Оскільки сучасні системи БПЛА дедалі частіше працюють у складних середовищах, питання побудови гнучких і водночас простих мережевих алгоритмів є одним із ключових напрямів розвитку.

Актуальність теми. Актуальність теми обумовлено необхідністю створення високоефективних технологій маршрутизації роїв БПЛА, що зменшують обчислювальні витрати, забезпечує якісне перемикання між стратегіями маршрутизації залежно від стану мережі. Це особливо важливо в

реальних системах, де надійність і автономність є критичними, а обмеження ресурсів – значними.

Мета та завдання дослідження. Мета роботи – розробка інтелектуальної підсистеми управління роєм БПЛА.

Для досягнення поставленої мети, потрібно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз сучасних підходів до маршрутизації в *FANET*;
2. Формалізувати модель руху БПЛА і структуру топології *FANET*;
3. Розробити *rule-based* систему для вибору протоколу маршрутизації;
4. Створити симуляційний прототип *FANET* для перевірки алгоритмів;
5. Провести експерименти роботи прототипу системи та проаналізувати результати.

Об’єкт та предмет дослідження. Об’єкт дослідження – інтелектуальні системи управління роєм БПЛА. **Предмет дослідження** – технології гібридної маршрутизації *FANET*.

Методи дослідження.

У роботі використані наступні методи:

1. Математичне моделювання руху БПЛА за моделлю Гаусса–Маркова;
2. Графовий аналіз структури *FANET* з використанням *NetworkX*;
3. Імітаційне моделювання динамічної топології;
4. Статистичне усереднення результатів;
5. Порівняльний аналіз експериментальних даних;
6. Дискретно–подієве моделювання маршрутизації.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає в формуванні *rule-based* моделі гібридного маршрутизатора для *FANET*, яка поєднує переваги *OLSR* і *AODV*.

Практичне значення. Запропонована система може використовуватися в задачах колективного управління БПЛА, а саме у прикордонному моніторингу та нагляді, пошуково–рятувальних операціях, військових застосуваннях для організації стійкого мережевого зв’язку, для побудови прототипів інтелектуальних роїв, у навчальних симуляторах *FANET*.

Rule-based алгоритм є ресурсно дешевим, забезпечує передбачувану поведінку і може реалізовуватися на бортових комп'ютерах з обмеженою потужністю.

Апробація результатів. Основні положення роботи доповідалися у вигляді тез доповіді на *XXV* Міжнародній науково–практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених “ПОЛІТ. Сучасні проблеми науки” (Київ, 2025).

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЇ КООРДИНАЦІЇ РОЇВ БПЛА В *FANET*

Рої БПЛА стають дедалі важливішим елементом у різних галузях завдяки їхній здатності виконувати складні завдання колективно. Рій БПЛА представляє трансформаційну технологію, яка дозволяє виконувати колективні завдання, такі як спостереження, реагування на катастрофи та військові операції [1].

Використання роїв БПЛА дозволяє досягти масштабованості, де окремі дрони координуються для виконання складних завдань. Ця технологія набирає популярності завдяки їхній гнучкості та здатності автономно діяти у складних середовищах. Історично еволюція технології БПЛА змістилася від операцій з одним апаратом до координованих систем рою за останні десятиліття. Такий розвиток підкреслює необхідність їх ефективної координації [2].

Цивільні потреби, такі як моніторинг сільського господарства та логістика, поряд із військовим використанням, як-от розвідка, підкреслюють зростаючу важливість роїв БПЛА. Технологія роїв підвищує ефективність цивільного реагування на катастрофи, дозволяючи швидке розгортання та охоплення. Така багатофункціональність роїв БПЛА робить їх майбутнім фундаментом повітряних технологій [3].

1.1 Проблема координації та нестабільності мереж

Рої БПЛА характеризуються відсутністю фіксованої інфраструктури та вимогою, щоб вузли співпрацювали розподіленим чином для підтримки зв'язку та виконання функцій маршрутизації в динамічних умовах.

<i>Кафедра КСМ</i>				ДУ «КАІ» 25 42 14 001 ПЗ			
<i>Виконав</i>	<i>Могильний П. Ю.</i>			<i>Технології координації роїв БПЛА в FANET</i>	<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Керівник</i>	<i>Гузій М. М.</i>				<i>Н</i>	<i>13</i>	<i>85</i>
<i>Консульт.</i>					<i>123 М-123-24-1-КС</i>		
<i>Норм. контр.</i>	<i>Фоміна Н.Б.</i>						
<i>Зав. Каф.</i>	<i>Іскренко Ю.Ю.</i>						

Традиційні протоколи маршрутизації *MANET* та *VANET* не можуть ефективно підтримувати мережі БПЛА через тривимірну мобільність, вищу швидкість вузлів та постійно змінну топологію. Класифікацію *ad-hoc* мереж зображено на рисунку 1.1.

FANET (*Flying Ad Hoc Networks*) – являють собою особливий клас бездротових мереж, де вузлами мережі є безпілотні літальні апарати, що працюють у високодинамічних тривимірних середовищах [4].

БПЛА характеризуються високою мобільністю, внаслідок чого зміни топології відбуваються часто, що призводить до розривів з'єднань і втрат пакетів. Такі зміни зв'язків спричиняють їх обриви, що ускладнює координацію в рої, особливо в умовах реального часу, таких як рятувальні операції або військові маневри [5].

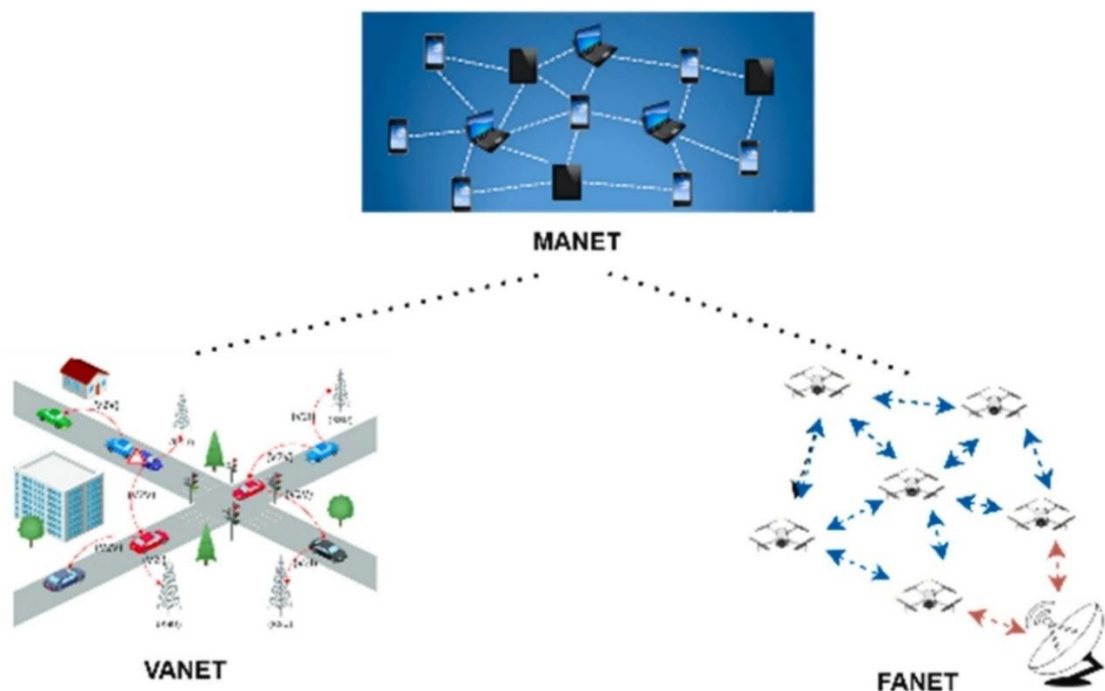


Рисунок 1.1 – Класифікація *ad-hoc* мереж: наземні *MANET*, транспортні *VANET* та повітряні *FANET* [6]

Мережа функціонує децентралізовано, де кожен *UCAV* (*Unmanned Combat Aerial Vehicle*) є автономним вузлом, здатним самостійно здійснювати

маршрутизацію. *FANET* відрізняється від *MANET* і *VANET* тим, що рівень мобільності є значно вищим: вузли рухаються з високими швидкостями в межах від 30 до 460 км/год. Топологія *FANET* є динамічною, тому вона може набувати різних форм, зокрема зіркоподібної або сітчастої. Кожна з таких топологій має свої переваги та недоліки з точки зору надійності з'єднання та складності маршрутизації. Таким чином, у разі відмови будь-якого БПЛА порушуються всі з'єднання, в яких він брав участь, що вимагає оновлення топології мережі [7]. На рисунку 1.2 зображено типову архітектуру *FANET*.

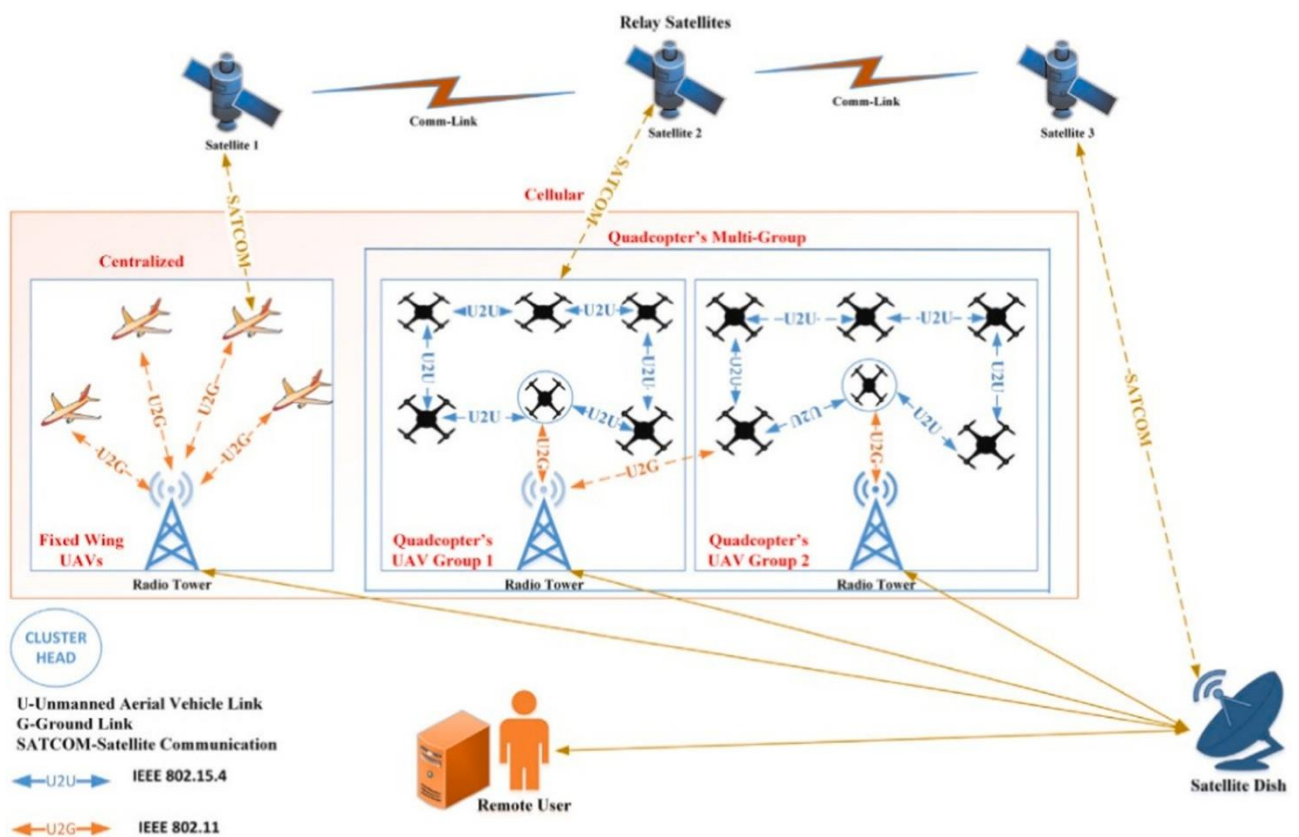


Рисунок 1.2 – Архітектура *FANET* [6]

Висока мобільність вузлів є фундаментальним фактором, що динамічно змінює параметри мережевої інфраструктури, і коли вузли, такі як БПЛА, постійно переміщуються у просторі, це призводить до каскаду взаємопов'язаних технічних проблем. Наслідком динамічної топології є часті розриви зв'язку та необхідність переключення, і при виході вузла із зони покриття одного джерела

зв'язку та входженні в зону іншого виникає потреба в оперативному переналаштуванні маршруту, що часто супроводжується короткочасними перебоями.

Архітектура *FANET*, як і інші бездротові мережі, також має багаторівневу архітектуру, проте кожен рівень працює в умовах підвищеної нестабільності [8].

Фізичний рівень відповідає за трансляцію сигналів між вузлами мережі та особливо потрапляє під вплив багатопроменевого загасання, доплерівського зсуву, а також інших перешкод та змін відстані між вузлами. Для каналів від БПЛА до БПЛА традиційними проблемами є доплерівський ефект і флуктуація рівня сигналу, у той час як для каналів повітря-земля великими проблемами є Райсівське згасання та екранування будівлями й рельєфом. Фізичний рівень є причиною значних втрат і погіршення якості обслуговування архітектур *FANET* [8].

Канальний рівень мережі відповідає за керування каналом передачі даних, вирішення колізій, механізми повторних передач і підтвердження доставки. Канальні моделі мереж *FANET* мають проблеми високої щільності передавачів, колізій та перевантаження каналу під час групового обміну даними [8].

Мережевий рівень відповідає за побудову маршруту до пакету і повернення в разі втрати зв'язку. Умови високої мобільності вузлів призводять до різкого падіння продуктивності традиційних протоколів маршрутизації *MANET* з мінімальною можливістю адаптації до швидких змін топології системи. Тому у *FANET* широко досліджується протоколи: проактивні, реактивні та гібридні, які можуть знаходити раціональний баланс між затримкою, надмірністю керованого трафіку та надійною передачею [8].

Прикладний рівень визначає області застосування рою БПЛА: відеоспостереження, військовий моніторинг, пошуково-рятувальні операції, розвідка, доставка і т. д. Вимоги цільового рівня визначають критерії якості: максимальну затримку, швидкість втрат пакетів і максимальний коефіцієнт доставки пакетів (*PDR*) [8].

Існує три стандартні різновиди реалізації цієї інфраструктури: інфраструктура, безінфраструктурна та гібридна. В інфраструктурній реалізації всі учасники ділянки підключаються до земної станції або центрального керівництва, що і визначає взаємодію рою. Такий підхід спрощує управління, однак створює критичну точку відмови.

Безінфраструктурна архітектура заснована на повністю автономній взаємодії БПЛА, де кожен елемент одночасно виконує функції маршрутизатора і ретранслятора. Цей підхід забезпечує стабільність мережі, проте ускладнює синхронізацію та призводить до зростання затримок.

Гібридна архітектура поєднує централізоване керування з локальною *ad-hoc* взаємодією між БПЛА.

У рої БПЛА виділяються різні ролі вузлів: лідер рою відповідає за координацію руху, прийняття стратегічних рішень та взаємодію з наземними станціями. Ретрансляційні вузли забезпечують передачу даних між віддаленими сегментами мережі та формування багатоходових маршрутів, при цьому саме вони зазнають найбільшого енергетичного навантаження. Сенсорні вузли виконують переважно функції збору інформації з датчиків і передають зібрані дані в мережу з мінімальною участю в маршрутизації.

Залежно від напрямку передачі інформації у *FANET* розрізняють кілька типів зв'язку. Зв'язок *U2U (UAV-to-UAV)* забезпечує безпосередню взаємодію між БПЛА та формує просторову сіткову-мережу, яка є основою багатоходової маршрутизації. Зв'язок *A2G (Air-to-Ground)* використовується для передавання телеметрії, відео та команд управління. Зв'язок *G2U (Ground-to-UAV)* забезпечує дистанційне керування польотом [9].

Ефект Доплера через мобільність БПЛА може погіршити цілісність сигналу, збільшуючи кількість втрачених пакетів. У міських умовах, де БПЛА часто використовуються, багатопрореневе загасання є суттєвою проблемою через велику кількість будівель, що створюють відбиття. БПЛА не можуть продовжувати працювати більше певного часу через енергетичні обмеження, і вибір маршруту є ключовим для мінімізації споживання енергії через мережеву

комунікацію. Підтримання зв'язку в умовах постійної зміни положення є енергоємним процесом, де мобільні вузли, зокрема БПЛА, змушені постійно сканувати доступні канали, ініціювати встановлення нових зв'язків та, за необхідності, збільшувати потужність передачі сигналу, що призводить до прискореного виснаження джерел живлення [10].

Управління рухом здійснюється на основі диференціальних рівнянь 1.1 та 1.2, що описують траєкторію і швидкість.

$$\frac{dr}{dt} = v, \quad (1.1)$$

$$\frac{dv}{dt} = a, \quad (1.2)$$

де r – радіус–вектор положення, v – вектор швидкості, a – вектор прискорення, що залежить від маневреності та зовнішніх факторів. Ця модель є основою для прогнозування траєкторій БПЛА в роях, враховуючи їхню тривимірну мобільність [11].

Радіус–вектор r визначається як функція часу 1.3 і відображає координати БПЛА в тривимірному просторі

$$r = (x(t), y(t), z(t)). \quad (1.3) [11]$$

Вектор швидкості v є похідною від r за часом, що відображає зміну положення. Вектор швидкості $v = \frac{dr}{dt}$ характеризує напрямок і величину переміщення БПЛА [11]. Прискорення a залежить від маневреності апарата та зовнішніх сил. Вектор прискорення $a = \frac{dv}{dt}$ є результатом дії сил управління, гравітації, вітру та інших зовнішніх факторів [11].

Для врахування маневреності вводиться компонент керування. Компонент прискорення визначається системою автоматичного пілотування і залежить від кута нахилу та потужності двигунів [12].

Зовнішні фактори включають вплив вітру. Вплив вітру моделюється як додаткова сила, що залежить від швидкості та напрямку повітряного потоку. Перешкоди також впливають. Сила від перешкод виникає через фізичні бар'єри, такі як будівлі чи рельєф, і потребує коригування траєкторії. Загальне прискорення є сумою цих компонентів [12].

Для енергетичного аналізу використовується спеціальна модель споживання. Енергетичне споживання БПЛА описується як відношення 1.4.

$$E(t) = E_0 - \int_0^t P(v, a) dt, \quad (1.4) [12]$$

де E_0 – початкова енергія, а $P(v, a)$ – потужність, що залежить від швидкості та прискорення. Потужність залежить від руху. Потужність P враховує квадратичну залежність від швидкості та лінійну залежність від прискорення, де k_1 і k_2 – коефіцієнти, що залежать від конструкції апарата. Ця модель дозволяє оцінити час автономності. Час автономного польоту визначається як момент, коли $E(t)$ досягає критичного рівня, що зазвичай становить 60 хвилин для типових БПЛА [12].

Координація рою вимагає синхронізації траєкторій, що досягається через узгодження векторів v між вузлами. Для *FANET* модель розширюється шляхом додавання мережевих параметрів, таких як затримка зв'язку [12].

Електронні перешкоди можуть посилити нестабільність зв'язків, знижуючи надійність комунікацій у *FANET*. Негативні погодні умови, такі як сильний вітер чи дощ, можуть порушувати комунікаційні зв'язки *FAN*. Швидкість вітру вище 10 м/с може спричинити відхилення траєкторій у роях БПЛА [11].

Отже, з точки зору маршрутизації та підтримки стабільної роботи мереж, *FANET* є дуже складним класом з власною низкою проблем. Велика мобільність вузлів, часті розриви каналів, багатопроменеве згасання та жорстке обмеження за обчислювальною енергією створюють середовище, в якому класичні протоколи працюють незадовільно з погляду надійності та якості обслуговування. Подібна передумова викликає актуальність науково-практичної задачі адаптивних методів

маршрутизації, які могли б динамічно контролювати як топологічну нестабільність, так і енергетичний рівень у кожному вузлі рою БПЛА.

1.2 Аналіз протоколів маршрутизації

Розглядаючи особливості координації роїв БПЛА в нестабільних мережах *FANET*, варто звернути увагу на ключові механізми, які забезпечують обмін даними між вузлами. Протоколи маршрутизації відіграють вирішальну роль у підтримці зв'язку в умовах високої мобільності та динамічної топології. Ці протоколи, поділені на проактивні, реактивні та гібридні типи, адаптуються до унікальних викликів *FANET*, забезпечуючи ефективну передачу даних у тривимірному просторі. Розуміння їхньої структури та функціонування є необхідним для розробки інтелектуальної підсистеми управління, що враховує специфіку таких мереж [13].

Проактивний *OLSR* зменшує обсяг службового трафіку, обираючи вузли *MPR* (*Multipoint Relay*) для ретрансляції маршрутної інформації, використовуючи алгоритм Дейкстри для пошуку найкоротших шляхів. Наприклад, на рисунку 1.3 вузол *A* має можливість призначити ретрансляторами маршрутної інформації (у ролі *MPR*-вузлів) точки *J*, *C*, *H*, *E*, які забезпечують охоплення всіх інших вузлів, розташованих від *A* на відстані двох передач [14].

Вибір вузлів *MPR* мінімізує надлишкову розсилку керуючих повідомлень у протоколі *OLSR*. Основним недоліком *OLSR* є високі накладні витрати керуючого трафіку в умовах високої мобільності мережі. *OLSR* підтримує актуальні таблиці маршрутизації, що робить його придатним для стабільних топологій. Також протокол демонструє найкращу продуктивність при щільності вузлів від 10 до 20 БПЛА на квадратний кілометр. Приклад розсилки маршрутної інформації для *OLSR* включає періодичне відправлення *Hello*-пакетів для виявлення сусідів і *TC*-пакетів для оновлення топології. *Hello*-пакети містять список сусідів, а *TC*-пакети передають інформацію про *MPR*-вузли.

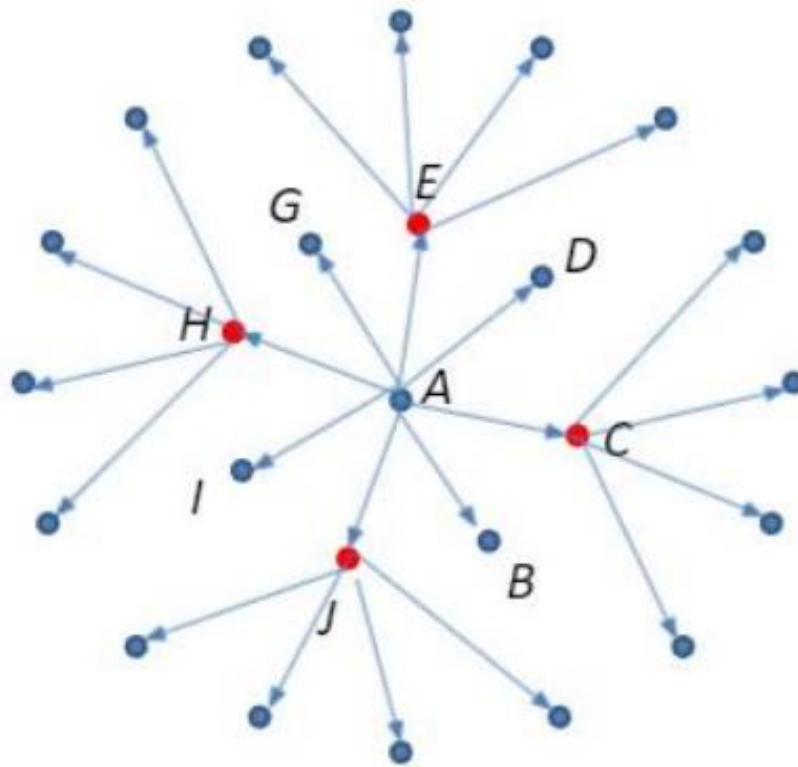


Рисунок 1.3 – Приклад розсилки маршрутної інформації для *OLSR* [14]

У *FANET* проактивний архітектурний підхід *OLSR* має найменший час передачі даних, оскільки його таблиці маршрутизації найбільш часто актуалізуються і надають перший маршрут вузлу маршрутизації. Проте при сценаріях високої мобільності елементів рою, він швидко стає неефективним через високий обсяг керуючого трафіку. Часте оновлення топології викликає зростання навантаження на канал і енергії обробки вузлів, що робить *OLSR* ефективним лише для стабільних або квазістабільних сценаріїв.

Реактивний протокол *AODV* встановлює маршрути за потреби, використовуючи повідомлення *RREQ* (*Route Request*) і *RREP* (*Route Reply*), із застосуванням номерів послідовності для уникнення зациклювання. Реактивна природа *AODV* дозволяє йому адаптуватися до змін топології у *FANET*. Процес виявлення маршруту призводить до затримок, особливо в мережах великого масштабу [15].

Формат зонда–запиту (*RREQ*) включає в себе ідентифікатор джерела, номер послідовності, адресу призначення та лічильник переходів. Формат зонда–відповіді (*RREP*) містить адресу джерела, номер послідовності, адресу призначення та кількість переходів до пункту призначення. У мобільних сценаріях *AODV* досягає коефіцієнта доставки пакетів 85%, порівняно з 70% для *DSR* [16].

Реактивний *AODV* особливо проявляє себе у мережах *FANET* з динамічною топологією, оскільки маршрути формуються лише за потреби. Це дозволяє суттєво зменшити обсяг керуючого трафіку та знизити навантаження на канал зв'язку. Проте, підхід *AODV* передбачає використання маршрутів у топології лише за потреби, тобто шлях формується тільки в момент виникнення запиту на передачу даних, що зменшує обсяг керуючого трафіку та знижує навантаження на канал зв'язку. Водночас безпосередня необхідність ініціювання процедури пошуку маршруту призводить до додаткових затримок, що може створювати проблеми для критично важливих сервісів реального часу [17].

Реактивний протокол *DSR* формує повний маршрут, додаючи ідентифікатори вузлів у пакети *RREQ*, що гарантує відсутність зациклювання. Відповідно, кешування маршрутів у *DSR* збільшує навантаження в масштабних мережах. Етап створення маршруту (метод *DSR*) включає розсилку зондів–запитів, де кожен вузол додає свій ідентифікатор (див. рисунок 1.4). Передача зонда–відповіді повертає маршрут від призначення до джерела через зворотний шлях. *DSR* ефективний у невеликих мережах, але втрачає переваги при масштабуванні [16].

Протокол *DSR* забезпечує максимально просту маршрутизацію та відсутність зациклення, оскільки інформація про маршрут зберігається в кожному пакеті. Одночасно, у мережах *FANET* цей підхід швидко стає неефективним через стрімку зміну топології. Зокрема, зростанням заголовків та збільшенням числа запитів маршрутів перенасичується канал зв'язку та зменшується робоча масштабованість, що визначається рентабельністю даного підходу великими роями БПЛА.

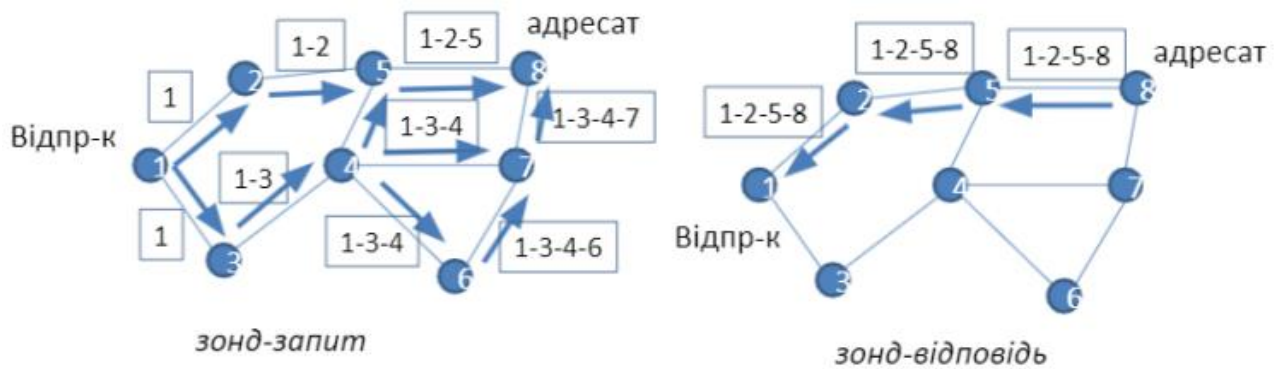


Рисунок 1.4 – Етап створення маршруту методом *DSR*: розсилка зондів–запитів, передача зонда–відповіді [16]

Гібридний протокол *AntHocNet* використовує біоінспіровану оптимізацію мурашиної колонії для адаптивного балансування проактивної та реактивної маршрутизації. Алгоритм мурашиної колонії в *AntHocNet* коригує маршрути на основі феромонних слідів, підвищуючи адаптивність. Гібридні протоколи можуть підвищити надійність на 15–20% порівняно з окремими протоколами та адаптуватися до різних умов мережі, зменшуючи затримки від 10 до 15% [18].

Гібридні протоколи маршрутизації поєднують переваги проактивних та реактивних підходів, покращуючи баланс швидкості доставки даних та обсягу службового трафіку. У випадку мереж *FANET* вони є найбільш дієвими, оскільки дозволяють адаптивно налаштовувати робочі параметри залежно від стабільності топологій, інтенсивності трафіку та енергозабезпечення вузлів.

Підводячи підсумки сучасного стану речей маршрутизації у *FANET*: *OLSR* є ефективним у сценаріях з низькою мобільністю з навантаженням на контроль 5–10% від загального трафіку. *AODV* знижує навантаження на від 3 до 5%, але збільшує затримки на від 20 до 30 мс. Масштабованість *DSR* обмежена мережами з менш ніж 50 вузлами. Гібридні протоколи пропонують збалансований компроміс, досягаючи 90% *PDR* у змішаних умовах. У стабільних топологіях *OLSR* забезпечує швидке оновлення маршрутів. *AODV* адаптується до змін топології, але з латентністю *DSR* підходить для малих груп (див. таблицю 1) [16].

Таблиця 1 Порівняльний аналіз протоколів *FANET*

Протокол	Тип протоколу	Адаптивність до змін топології	Затримка (мс)	<i>PDR</i> (%)	Навантаження на контроль (%)	Масштабованість
<i>OLSR</i>	Проактивний	Підтримує актуальні таблиці маршрутизації, придатний для стабільних топологій	Низька (5–10)	До 70% у стабільних умовах	5–10% від загального трафіку	Обмежена при високій мобільності
<i>AODV</i>	Реактивний	Адаптується до змін топології в <i>FANET</i>	20–30	85% у мобільних сценаріях	3–5%	Краща в великих рогах
<i>DSR</i>	Реактивний	Забезпечує шляхи без циклів у невеликих мережах	Залежить від кешування	70% у мобільних сценаріях	Зростає в великих мережах	Обмежена до <50 вузлів
<i>AntHoc Net</i>	Гібридний	Адаптивно балансує проактивний та реактивний маршрутизацію	Зменшує затримки на 10–15%	90% у змішаних умовах	Покращено за феромонами	Підходить для великих роїв

Таким чином, жоден із класичних протоколів маршрутизації не може вважатися універсальним для всіх сценаріїв функціонування *FANET*. Проактивні протоколи забезпечують мінімальні затримки, але створюють надмірне енергетичне навантаження та перевантажують канал зв'язку. Реактивні протоколи є більш енергоощадними, однак поступаються за швидкістю реакції на зміну топології. Гібридні підходи формують компроміс між цими двома крайнощами, поєднуючи високу адаптивність із помірними накладними витратами. Саме це обґрунтовує доцільність подальшого дослідження та розробки адаптивних гібридних алгоритмів маршрутизації для мереж роїв

БПЛА, що враховують як топологічну нестабільність, так і енергетичні обмеження вузлів.

1.3 Постановка задачі

Розглядаючи специфіку функціонування роїв БПЛА в умовах *FANET*, стає очевидним, що ефективна координація залежить від подолання низки технічних перешкод, які визначають стабільність і продуктивність мережі. У наукових працях щодо *FANET* зазвичай розглядається весь набір показників якості обслуговування: транзитна затримка, *PDR*, пропускна здатність і об'єм службового трафіку, іноді джітер та рівень зв'язаності мережі. Однак для випадку рою БПЛА, що працюють у режимі реального часу, саме три групи показників особливо важливі: затримка (оперативність передачі інформації), *PDR* (коефіцієнт доставлених даних), витрати(тривалість автономної роботи рою). Вибір також зумовлений сучасними дослідженнями, відповідно до яких встановлюється баланс між надійністю та затримками при жорстких енергетичних обмеженнях [19].

Загальна затримка в *FANET* варіюється від 50 до 200 мс через часті розриви зв'язків, особливо в умовах високої щільності вузлів. Перешкоди та зіткнення значно підвищують затримки, коли рій функціонує в складних міських середовищах. Затримка зростає пропорційно до кількості переходів, додаючи приблизно 10 мс за кожен перехід між вузлами. У великих роях, що перевищують 20 БПЛА, затримка може сягати 250 мс, ускладнюючи оперативне реагування, як показано на рисунку 1.5.

Кожне переключення каналу додає 15–20 мс затримки через вимоги до синхронізації. Така ситуація стає критичною в реальному часі, коли затримки перешкоджають виконанню завдань.

Затримки також залежать від швидкості руху вузлів, що ілюструється на рисунку 1.6, де показано зростання затримки зі збільшенням швидкості.

Латентність також залежить від інтенсивності перешкод, що може подвоїти час передачі в екстремальних умовах [20].

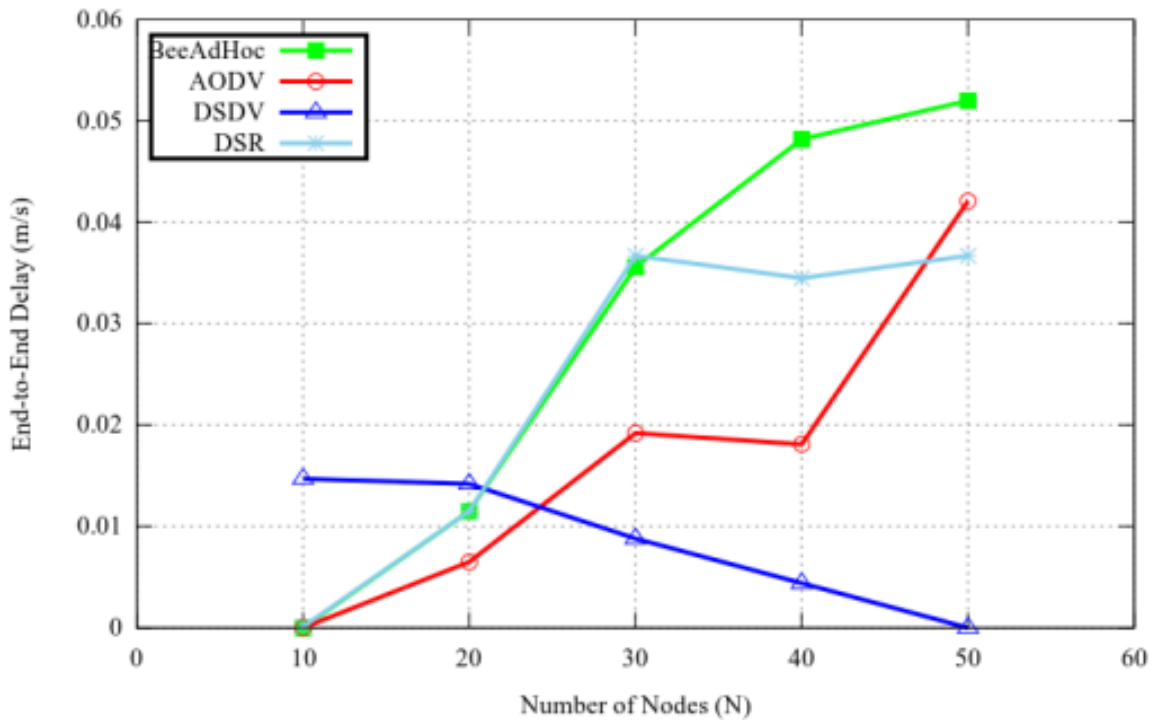


Рисунок 1.5 – Співвідношення наскрізної затримки та кількості вузлів [20]

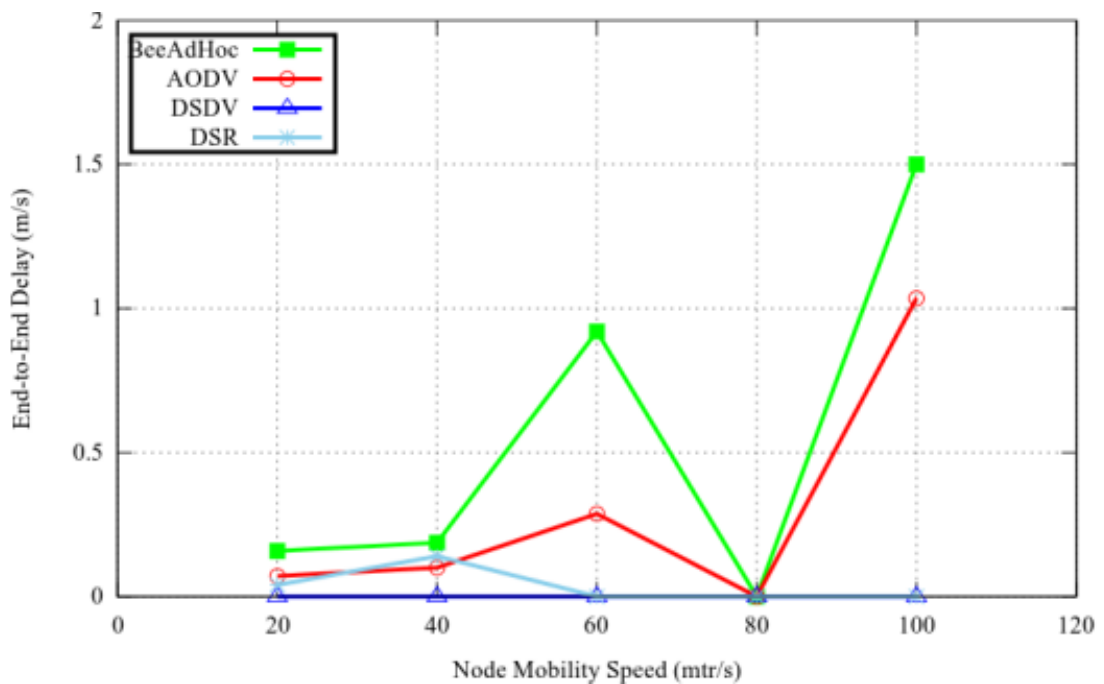


Рисунок 1.6 – Відношення наскрізної затримки до швидкості руху вузлів [20]

У цілому, в *FANET*–сценаріях експериментальні дослідження показують, що у стабільних умовах це значення може коригуватися в межах від 20 до 80 мс. Однак, у високодинамічних роях із швидкостями понад 30 м/с, передбачене значення підвищується до 300 мс. Крім того, деякі режими роботи більше піддавали затримці синхронізації. При цьому використання проактивних протоколів у стабільних умовах зменшує затримку, тоді як реактивні демонструють вищі пікові значення під час реконфігурації маршрутів [21].

Співвідношення доставки пакетів у *FANET* часто опускається нижче 80% через вплив загасання та швидких змін позицій. Ефект Доплера посилює втрати пакетів, піднімаючи їхній рівень вище 20% у високорухливих. Багатопроменеve загасання зменшує *PDR* на від 15 до 20% у міських районах через численні відбиття сигналу.

У несприятливих умовах *PDR* може впасти до від 60 до 70%, якщо не застосовувати спеціальні корективи. Використання адаптивної маршрутизації дозволяє підняти цей показник до 95% у стабільних ситуаціях, вказуючи на можливості вдосконалення. Втрати посилюються в зонах із сильними перешкодами, де *PDR* може впасти до 50% без належного втручання [21].

Сучасні аналітичні дослідження та експериментальні вимірювання підтверджують, що мережа БПЛА може розглядатися працездатною у випадку, коли рівень доставки пакетів *PDR* рівний або вище 85%. Цей індикатор є критичним для мереж забезпечення стабільних потоків обміну телеметричними даними, послугованими повідомленнями та координованого управління рухом рою. Щодо більш вимогливих можливих підсистем, спостереження у режимі реального часу та обслуговування пошукових та рятувальних операцій – межа *PDR* не може бути менше 90%, тому що в цих умовах навіть незначне вторинне втрата в пакетах призводить до деградації стану якості відео, наростання розсинхронізації та точності управління.

У таких умовах, як щільна міська забудова або радіоелектронні впливи, цей показник може зменшуватися від 60 до 75%, що в існуючій у науковій літературі розглядається як межа деградації роботи *FANET*. В цьому режимі пакети мають

значно більш поширені пересилання, збільшення затримок і погіршення стійкості маршрутів [22].

Енергію ж БПЛА значною мірою витрачають на комунікаційні процеси, обмежуючи час автономного польоту через обмеження акумуляторів. Виснаження енергії прискорюється через постійне сканування каналів і повторну передачу даних. У реальних операціях із інтенсивним обміном інформацією час польоту зменшується, вимагаючи ретельного планування ресурсів. Споживання енергії охоплює як зв'язок, так і рух, де витрати на передачу даних відіграють ключову роль у скороченні автономності. Ефективність енергії погіршується через багатопроточне загасання та надмірні ретрансляції, що створює додатковий тиск на систему. Оптимізація траєкторій стає вирішальною для зниження енергоспоживання під час комунікації в умовах обмеженого ресурсу. Енергетичні витрати зростають із збільшенням кількості вузлів, що вимагає інноваційних підходів до управління [23].

Значна частина енергії, яку використовує БПЛА, витрачається на сам процес мережного зв'язку, а не тільки на виконання льотного завдання. Згідно різних оцінок *FANET* займає від однієї чверті до майже половини енерговитрат апарата. Ключовими факторами таких втрат є: неповні переадресації після збою, ширококомовні передачі повідомлень керування та часті переналаштування маршрутів через нестабільність топології [24].

Перешкоди знижують *PDR* на від 10 до 15% і додають 30 мс до затримки через фізичні бар'єри, такі як будівлі чи рельєф. Радіоперешкоди можуть знизити рівень з'єднаності *FANET* до 40% у зонах з активним впливом, що призводить до збільшення затримки та зниження енергоефективності. Такі умови вимагають адаптивних алгоритмів для збереження стабільності мережі в екстремальних ситуаціях. Обмеження ресурсів посилюють ці проблеми, коли затримки та втрати досягають критичного рівня, що загрожує безпеці рою. Також зовнішні фактори, такі як погода, додають складності, коли сильний вітер чи дощ порушують зв'язок. Інтеграція передових методів, таких як гібридні протоколи, здатна пом'якшити ці виклики, підвищуючи загальну продуктивність системи [25].

Щодо масштабування, збільшення кількості БПЛА у рої призводить до зростання затримок через більшу кількість переходів і зіткнень. У роях із понад 50 вузлами втрати пакетів перевищують 30%, погіршуючи *PDR*. Енерговитрати зростають пропорційно числу вузлів, скорочуючи час автономності у великих конфігураціях. Масштабування вимагає адаптивних стратегій для підтримки стабільності. Гібридні підходи можуть компенсувати ці ефекти, забезпечуючи кращу адаптацію [12].

Як демонструють дослідження, адаптивні алгоритми стають незамінними для зменшення затримок у великих роях, зокрема коли кількість БПЛА перевищує 50 вузлів. Використання інтелектуальних методів, таких як навчання з підкріпленням, дозволяє підвищувати *PDR* до 90% навіть у складних умовах, наприклад, у міських зонах із багатопроменевим загасанням. Енергоефективність зростає завдяки оптимізації маршрутів, що зменшує споживання енергії на 15% у порівнянні з традиційними підходами, зокрема при використанні гібридних протоколів у роях із від 20 до 30 БПЛА. У зонах із сильними перешкодами, такими як бойові зони з рівнем інтерференції 90 дБ, адаптивні системи підтримують стабільність, знижуючи втрати пакетів до 10% завдяки динамічному перерозподілу трафіку. Такий підхід забезпечує стійкість рою в умовах масштабування та зовнішніх факторів, таких як вітер зі швидкістю 10 м/с, що викликає відхилення траєкторій [25].

Інший шлях це гібридні протоколи, що дозволяють балансувати між затримками та *PDR*. Адаптивні стратегії, що враховують масштаб, знижують вплив перешкод. У майбутніх розробках гібридні системи стануть стандартом для *FANET*, підвищуючи автономність. Такі технології забезпечать стійкість рою до зовнішніх факторів.

Також це може дати змогу знизити сумарне споживання енергії порівнянні з чисто реактивними підходами за рахунок зменшення кількості оновлень маршрутів і надмірного керуючого трафіку [24].

Висновки до розділу

Таким чином, у першому розділі виконано комплексний аналіз проблеми координації роїв БПЛА в середовищі *FANET*. Визначено, що рої БПЛА – перспективна технологія для вирішення великого кола цивільних та військових задач, але їх ефективне функціонування залежить від якості мережевої взаємодії за умов високої мобільності, тривимірного простору та постійної зміни топології. Виявлено, що *FANET* суттєво відрізняється від звичайних *MANET* та *VANET* за рівнем динамічності, швидкістю вузлів та характером каналів зв'язку. Це призводить до частих розривів з'єднань, змін маршрутів, впливу доплерівського ефекту, багатопроменевого згасання, а також до жорстких енергетичних обмежень.

Оглянуто багаторівневу архітектурну структуру *FANET* з'ясовано призначення фізичного, каналного, мережевого та прикладного рівнів, а також визначено ключові типи архітектур (інфраструктурна, безінфраструктурна, гібридна), ролі вузлів у рої та основні типи зв'язку.

Проведено огляд сучасних протоколів маршрутизації в *FANET*, зокрема *OLSR*, *AODV*, *DSR* та гібридні підходи. Показано, що проактивні протоколи забезпечують мінімальні затримки за рахунок постійної підтримки таблиць маршрутизації, але створюють значне навантаження на канал і енергетичні ресурси. Реактивні протоколи є більш енергозберігаючими, проте характеризуються підвищеними затримками під час пошуку маршрутів. Гібридні протоколи поєднують переваги обох підходів і демонструють кращу адаптацію до змін умов функціонування *FANET*, що робить їх перспективними для практичного використання. Обґрунтований вибір ключових метрик якості роботи *FANET* – затримок, коефіцієнту доставки пакетів (*PDR*) і енергоспоживання. Представлено, що саме ці показники напряму впливають на керування роїв, надійність передачі інформації і тривалість автономної роботи системи.

Встановлено, що в умовах високої динаміки і масштабуванні роїв ці параметри істотно деградують без застосування адаптивних алгоритмів

маршрутизації. Таким чином, результати аналізу доводять, що ефективна координація роїв БПЛА у середовищі *FANET* слугує складною науково–практичною проблемою, яка потребує застосування штучних гібридних алгоритмів маршрутизації, що здатні одночасно враховувати топологічну нестабільність, обмеженість енергетичних ресурсів і врахування затримок і надійності зв'язку. Це обґрунтовує актуальність подальших досліджень, спрямованих на розробку та моделювання адаптивних гібридних алгоритмів маршрутизації, що й становить основу наступних розділів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДСИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РОЄМ БПЛА

Аналіз проблеми координації роїв БПЛА в умовах нестабільних мереж *FANET*, проведений у попередньому розділі, виявив ключові виклики, пов'язані з динамічною топологією, втратами пакетів, затримками та енергоспоживанням. Для їхнього подолання необхідна розробка інтелектуальної підсистеми управління роєм БПЛА, яка інтегрує класичні протоколи маршрутизації. Цей розділ присвячено теоретичним основам такої підсистеми, включаючи математичні моделі топологій *FANET*, гібридні алгоритми маршрутизації та методи прийняття рішень у децентралізованих мережах.

2.1 Моделі та топології в *FANET*

Теоретичні моделі *FANET* є основою для розуміння поведінки роїв БПЛА в тривимірному просторі, де традиційні плоскі моделі *MANET* не враховують вертикальну мобільність і динамічні зміни висоти. Моделі мобільності, такі як модель Гаусса–Маркова, дозволяють симулювати реалістичні траєкторії з кореляцією швидкостей, а топологічні структури визначають ефективність зв'язку та маршрутизації. Цей підрозділ розглядає ключові моделі мобільності, 3D–вектори автоналаштування та основні динамічні топології: зіркоподібну, сітчасту, кластерну.

Модель мобільності Гаусса Маркова вперше була введена Лянгом і Хаасом і широко використовується.

<i>Кафедра КСМ</i>				ДУ «КАІ» 25 42 14 002 ПЗ				
<i>Виконав</i>	<i>Могильний П. Ю.</i>			<i>Методи та моделі функціонування інтелектуальної підсистеми управління роєм БПЛА</i>	<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>	
<i>Керівник</i>	<i>Гузій М. М.</i>				<i>Н</i>	32	85	
<i>Консульт.</i>					<i>123 М-123-24-1-КС</i>			
<i>Норм. контр.</i>	<i>Фоміна Н.Б.</i>							
<i>Зав. Каф.</i>	<i>Іскренко Ю.Ю.</i>							

У цій моделі передбачається, що швидкість мобільного вузла співвідноситься з часом і моделюється як стохастичний процес Гаусса Маркова.

У полі двовимірного моделювання стохастичний процес Гаусса Маркова може бути представлений наступними рівняннями 2.1.

$$\bar{V}_t = \alpha \bar{V}_{t-1} + (1 - \alpha) \bar{v} \sqrt{(1 - \alpha^2) \sigma \bar{W}_{t-1}}, \quad (2.1) [26]$$

де $V_t = [v_t^x, v_t^y]^T$ та $V_{(t-1)} = [v_{(t-1)}^x, v_{(t-1)}^y]^T$ є швидкість у час t та $t-1$. $W_t = [w_t^x, w_t^y]^T$ є некорельований випадковим Гауссовим процесом із середнім значенням та дисперсією [26].

Модель Гаусса–Маркова описує рух БПЛА як випадковий процес з кореляцією швидкостей, дозволяючи симулювати реалістичні траєкторії, що типово для роїв у динамічних умовах. 3D–вектори для автоналаштування забезпечують адаптацію до змін висоти та напрямку, покращуючи зв'язок у вертикальній площині [11]. Модель Гаусса–Маркова дозволяє прогнозувати позиції вузлів у динамічних умовах, як показано на рисунку 2.1.

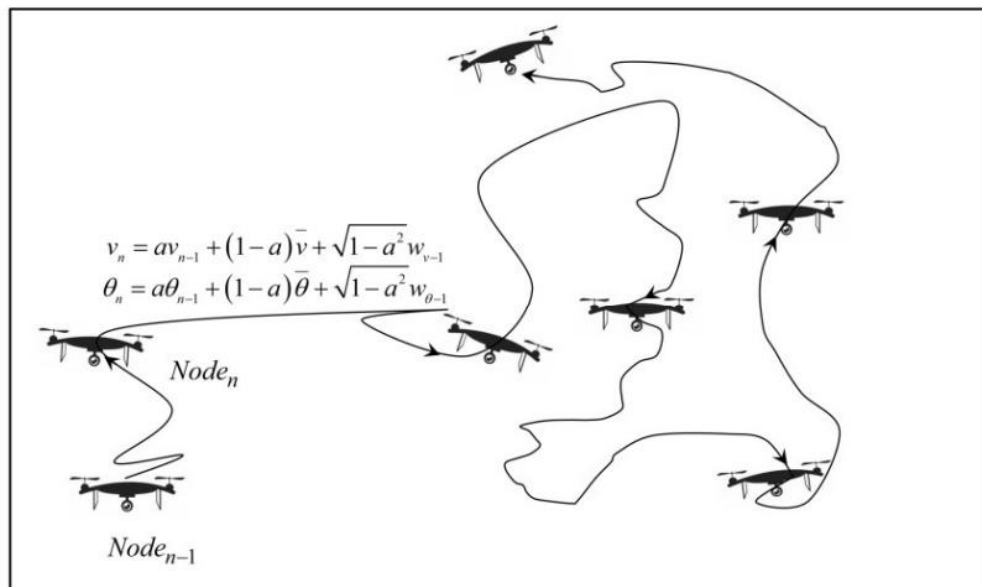


Рисунок. 2.1 – Траєкторія руху вузла в моделі мобільності GM [27]

3D-вектори автоналаштування зменшують втрати сигналу при змінах висоти. Сітчаста топологія забезпечує стійкість до відмови вузлів, тоді як кластерна структура оптимізує енергію в великих роях з щільністю вузлів від 5 до 50 на кубічний кілометр. Кластерна модель зменшує енергоспоживання на у роях із 50 вузлами, як на рисунку 2.2 [28].

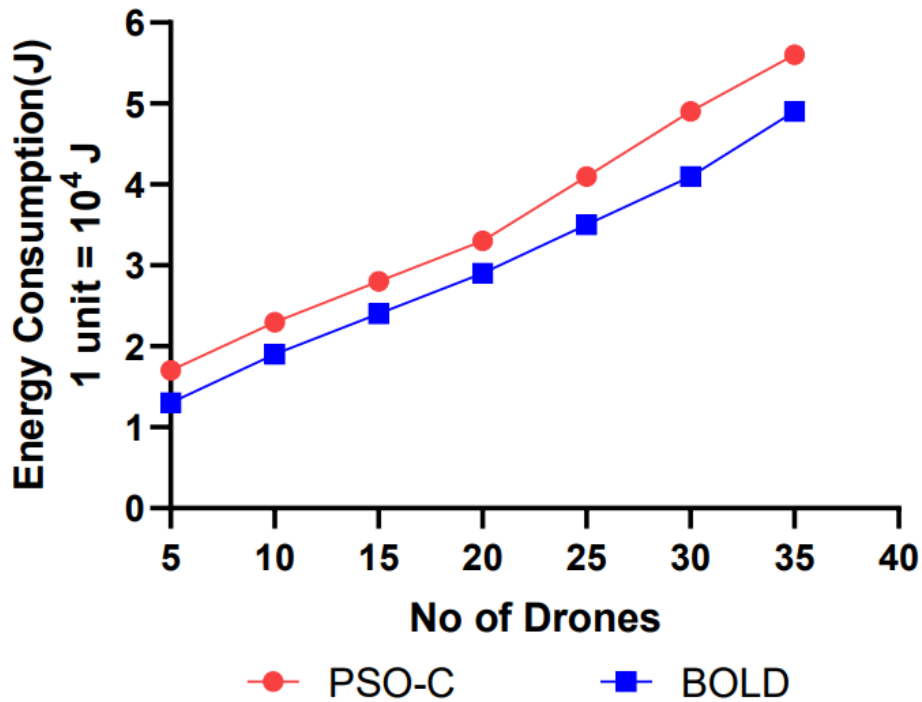


Рисунок 2.2 – Споживання енергії залежно від кількості дронів [28]

Позиція кожного БПЛА в *FANET* описується вектором тривимірних координат (див. формулу 2.2).

$$r(t) = (x(t), y(t), z(t)), \quad (2.2)$$

де $(x(t), y(t), z(t))$ представляють просторове положення БПЛА в момент часу t . Цей опис є основою тривимірної моделі моделювання зв'язності та оцінки якості каналу в умовах висотного польоту. На основі $r(t)$ виконується динамічна оцінка відстаней між вузлами, що безпосередньо впливає на рівень ослаблення

сигналу, ймовірність встановлення каналу та тимчасову топологію мережі. Однією з найпоширеніших моделей для моделювання руху БПЛА в *FANET* є модель мобільності Гаусса–Маркова, завдяки її можливостям враховувати кореляцію швидкості транспортного засобу між сусідніми точками часу та описувати як плавний, так і випадковий рух агентів. Коефіцієнт доставки пакетів (*PDR*) залежно від кількості БПЛА зображено на рисунку 2.3 [28].

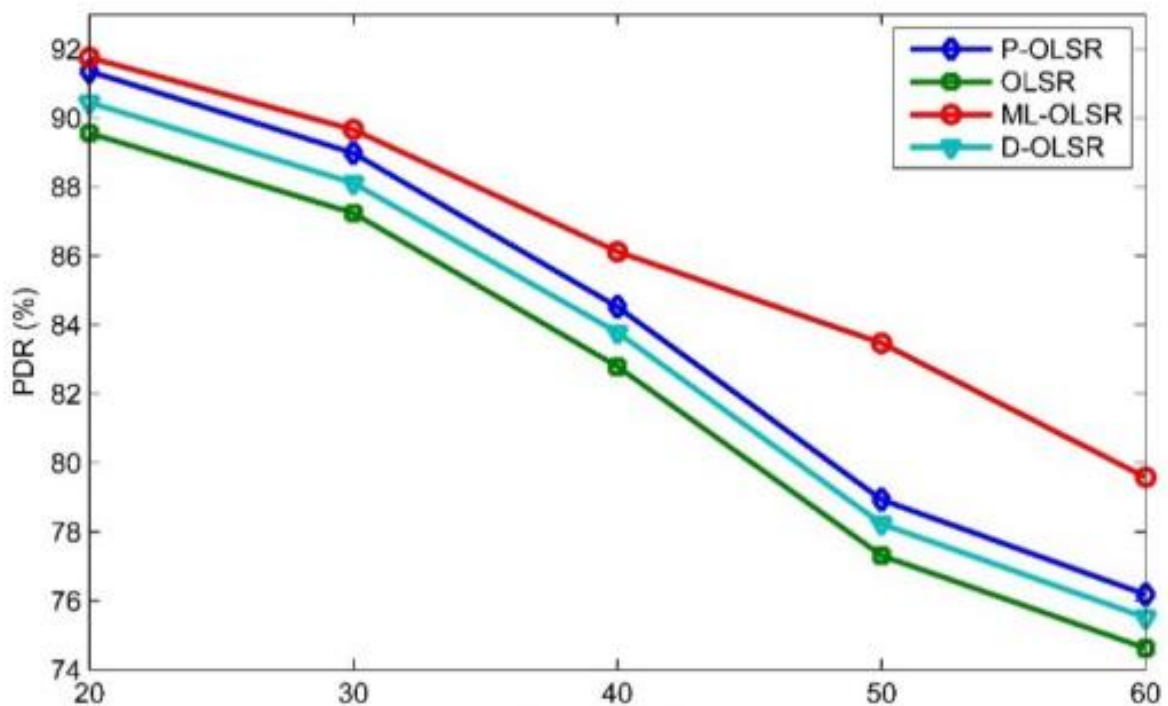


Рисунок 2.3 – Коефіцієнт доставки пакетів (*PDR*) залежно від кількості БПЛА [28]

Швидкість транспортного засобу задається формулою 2.3.

$$v(t) = \alpha v(t - 1) + (1 - \alpha)\bar{v} + \sqrt{1 - \alpha^2}w(t), \quad (2.3)$$

де $\alpha \in [0,1]$, v представляє середню швидкість, а $w(t)$ – гаусівський шум. Відповідна поведінка в рамках сценарію *FANET* підтримується при α від 0,5 до 0,8. Логічна топологія мережі формується на основі миттєвих координат вузлів,

яка є динамічною та змінюється з часом в пеленгах *FANET*. Завдяки результатам останніх досліджень можна виділити три основних види такої топології: зіркоподібну, сітчасту та кластерну. Зіркоподібна структура посилюється, коли більшість вузлів перебуває в зоні покриття одного центрального БПЛА, що призводить до концентрації трафіку й підвищеного енергетичного навантаження на цей вузол. Сітчаста топологія формується за умов перекриття зони покриття великої кількості апаратів і забезпечує наявність кількох альтернативних маршрутів, підвищуючи надійність доставки даних. Кластерна структура передбачає групування БПЛА в локальній підмножині з лідерами кластерів і дозволяє зменшити службовий трафік та енергоспоживання у великих роях [28].

Ймовірність зв'язності між вузлами *FANET* залежить від їх просторової щільності та радіуса зв'язку і в аналітичному вигляді може бути оцінена через середню кількість сусідів (формула 2.4).

$$C = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho, \quad (2.4) [27]$$

де r – радіус зв'язку, ρ – щільність вузла в просторі. Таким чином, зі зростанням щільності роутеру забезпечується ефективність доставки та ймовірність формування сітчастої топології, але одночасно збільшується ризик колізій та енергетичних втрат. Таким чином, вищеописані тривимірні координати r AND t , а також модель мобільності Гаусса–Маркова та вищенаведена щільність вузлів створюють спільну динамічну основу для створення різних типів топології у *FANET*, визначаючи стабільність, затримку та енергоефективність обміну даними в рої БПЛА [27].

Топологічні моделі *FANET* враховують щільність вузлів від 5 до 50 на кубічний кілометр, що є критичним для забезпечення рівня зв'язності в сітчастій структурі, де кожен вузол може бути пов'язаний із кількома сусідами, зменшуючи залежність від центрального елемента. На відміну від цього, зіркоподібна топологія вразлива до відмови центрального вузла, що призводить до повного розриву мережі при його виході з ладу, тому її використання обмежується малими

роями. Кластерна структура, у свою чергу, оптимізує енергоспоживання, розподіляючи навантаження між лідерами кластерів і членами, досягаючи економії у великих роях завдяки локалізації комунікацій. Інтеграція моделі Гаусса–Маркова з топологіями дозволяє прогнозувати ймовірність зв'язку з урахуванням динамічних траєкторій, що особливо важливо для сітчастої структури в умовах високої мобільності [29].

Ймовірність наявності стійкого радіозв'язку між двома вузлами *FANET* залежить від відстані між ними та параметрів загасання каналу. Для аналітичних моделей трансляційного каналу типу “повітря–повітря” та “повітря–земля” часто використовується експоненціальний закон від дистанції (формула 2.5).

$$P_c = e^{-\lambda d}, \quad (2.5) [29]$$

де P_c – ймовірність існування каналу зв'язку, d – відстань між БПЛА, λ – параметр середовищного загасання, який залежить від частоти передачі, висоти польоту та наявності перешкод. Ця модель широко використовується для оцінки зв'язку *FANET* у міському та інших середовищах [29].

В зв'язку з моделлю мобільності Гаусса–Маркова ця залежність дозволяє не лише описати зміну координат БПЛА, але й прогнозування динаміки з'явлення та зникнення радіоканалів у часі. Для великих значень параметра кореляції α від 0.7 до 0.9 рух вузлів плавний, ймовірність наявності каналу між сусідніми БПЛА зростає. Для маленьких значень α збільшується частота різкого маневру будь-якого з вузлів, що є недоцільним для *FANET*. Зміна висоти польоту змінює кут випрямлення та умови прямої видимості, а значить антена дає шуми та виходять на один з антенним каналі. Дослідження показали, що корекція просторової орієнтації антен у 3D–просторі дозволяє зменшувати середні втрати потужності та підвищувати стабільність зв'язку в умовах вертикальної мобільності [30].

Щільність розміщення вузлів є ще одним вирішальним фактором зв'язності; з зростанням щільності рою зростає середня кількість безпосередніх

сусідів кожного БПЛА, що підвищує ймовірність формування сітчастої топології та появи альтернативних маршрутів. Саме сітчасті структури забезпечують найбільшу стійкість до відмов вузлів завдяки надлишковості шляхів передачі. Тимчасом збільшення кількості активних з'єднань неухильно зумовлює ріст внутрішньомережевих колізій та енергоспоживання. Таким чином, ймовірність зв'язності в *FANET* формується спільним впливом просторової динаміки вузлів, характеристик загасання каналу та щільності розміщення БПЛА [30]. На рисунку 2.4 наведено приклад траєкторій кількох БПЛА, згенерованих за моделлю Гаусса–Маркова.

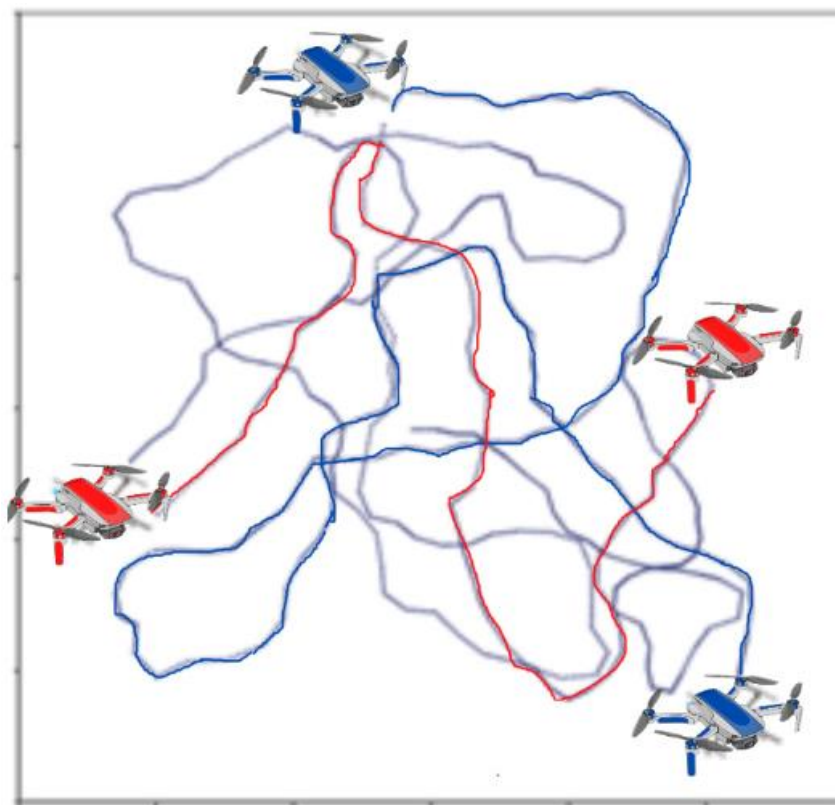


Рисунок 2.4 – Приклад траєкторій кількох БПЛА, згенерованих за моделлю Гаусса–Маркова [30]

Модель Гаусса–Маркова дозволяє відтворювати реалістичні сценарії руху, тоді як експоненційні моделі загасання забезпечують аналітичну оцінку

стабільності каналів зв'язку, що є необхідною основою для подальшого аналізу маршрутизації та енергоефективності рою [30].

Як видно, кожен апарат рухається по індивідуальній гладкій траєкторії, проте просторовий розбіг елементів системи у часі призводить до постійних змін розташувань між ними. Саме ці зміни напряму впливають на формування та розриви каналів зв'язку і, відповідно, на нестабільність маршрутів у *FANET*.

2.2 Гібридні алгоритми маршрутизації *FANET*

Гібридні алгоритми маршрутизації в мережах *FANET* поєднують проактивні і реактивні підходи з метою досягнення балансу між швидкістю маршрутизації, об'ємом службових переданих даних і енергоефективністю.

У високодинамічних роях БПЛА класичні протоколи, наприклад, *OLSR* або *AODV*, мають протилежні характеристики. *OLSR* забезпечує мінімальні затримки, але створює значне навантаження на канал, тоді як *AODV* є більш енергоефективним, але має великі затримки під час пошуку маршруту. Таким чином, гібридна маршрутизація сценаріїв *FANET* вважаються оптимальним компромісом.

Концепція полягає у динамічному визначенні потреб маршрутизації в залежності від стабільності топології, щільності покриття вузлів, швидкості руху та зв'язності мережі. Наприклад, проактивний маршрутизаційний режим із попередньо побудованими шляхами встановлено у стабільних ділянках, тоді як реактивний пошук активується на ділянках із частими розривами. Такий підхід дозволяє зменшити контрольний трафік без суттєвої затримки у передачі даних.

На рисунку 2.5 ілюструється узагальнена структура гібридної маршрутизації у *FANET*, де мережа поділяється на локальні стабільні області та динамічні прикордонні зони. У межах стабільної області таблиці маршрутів підтримуються проактивно, а для міжобласних з'єднань застосовується реактивний пошук.

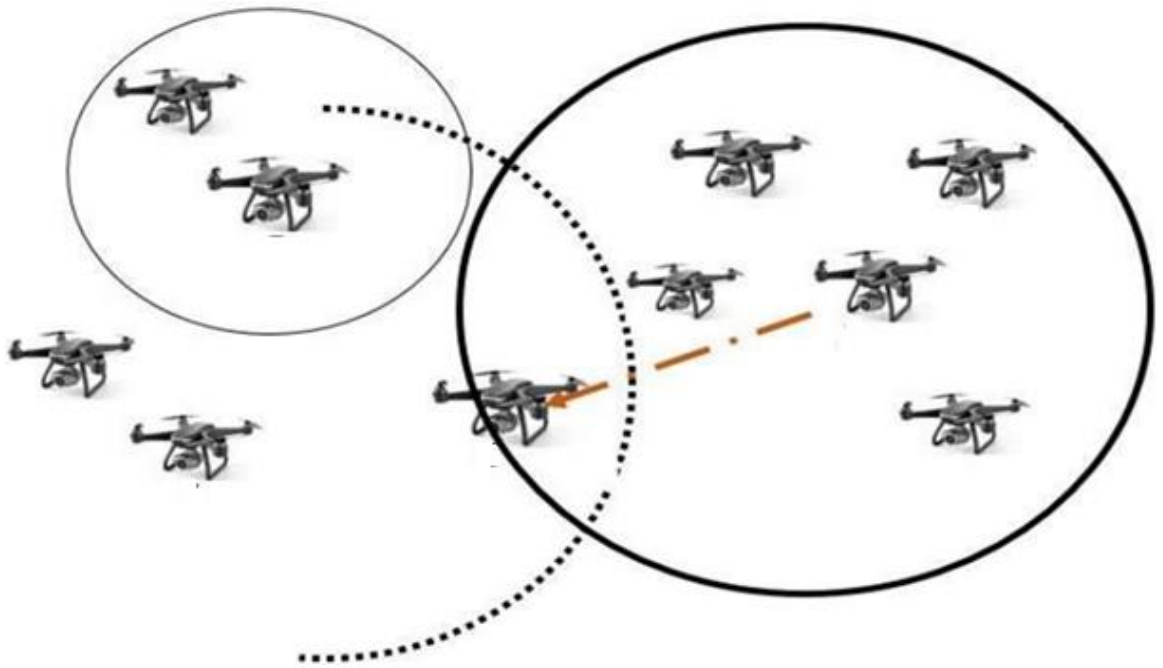


Рисунок 2.5 – Узагальнена архітектура гібридної маршрутизації у *FANET* [31]

Формально момент переключення між проактивним та реактивним режимами може визначатися умовою (формула 2.6).

$$H > H_{cr} \vee \frac{dN}{dt} > \delta, \quad (2.6)$$

де H – середня кількість переходів, H_{cr} – критичний поріг, N – кількість сусідів вузла, δ – гранична швидкість зміни топології. Ця формула широко застосовується в адаптивних гібридних *FANET*-протоколах для автоматичного переходу в режим реактивного пошуку [29].

Одним з важливих напрямків гібридної маршрутизації є біоінспіровані алгоритми, а саме *ACO* (моделі мурашиної колонії), які використовують феромонні мітки для адаптивного вибору маршрутів. На відміну від класичних алгоритмів, такі методи не потребують повного знання топології та добре працюють у відмовостійких сітчастих *FANET*-структурах [28]. Оновлення феромонного середовища здійснюється за формулою 2.7.

$$\tau_{ij}(t + 1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}, \quad (2.7) [18]$$

де, ρ – коефіцієнт випаровування, $\Delta\tau_{ij}$ – внесок нової інформації про якість каналу між вузлами i та j . Такий підхід до адаптації маршрутів забезпечує їх автономність у разі знищення зв'язків [18].

Виокремлюють кросрівневі гібридні алгоритми, які окрім мережевих параметрів, враховують ще й фізичні рівні – потужність сигналу, рівень шуму, доплерівський зсув. Такі алгоритми дозволяють змінювати маршрут, відповідно до реального стану каналу передачі. Критерієм вибору кращого маршруту є відношення 2.8.

$$U = \alpha \cdot PDR - \beta \cdot D - \gamma \cdot E, \quad (2.8) [32]$$

де D – затримка, E – енергоспоживання, α, β, γ – вагові коефіцієнти. Максимізація цієї функції веде до знаходження компромісу між швидкістю передачі та автономністю рою. Енергоорієнтовані гібридні протоколи особливо актуальні для *FANET*, оскільки вузли одночасно витрачають енергію на рух і зв'язок. Експерименти показують, що адаптивне обмеження ширококомовних повідомлень у гібридних протоколах дозволяє зменшити енергоспоживання на від 15 до 25% у порівнянні з чисто проактивними схемами [32].

У підсумку, із підвищенням щільності мережі, гібридні алгоритми підвищують рівень автономності. З точки зору масштабу, гібридним підходам надають перевагу. У великих роях, більше 40 БПЛА, використання виключно реактивних протоколів призводить до різкого зростання службового трафіку. Гібридні ж механізми локалізують ці процеси в межах окремих кластерів, що підвищує масштабованість системи.

Підсумовуючи, можна дійти висновку, що гібридні протоколи є кращим рішенням для *FANET*, так як: поєднують швидкість проактивних протоколів і енергоефективність реактивних; забезпечують стійкість до частих розривів зв'язку; знижують навантаження на канал у великих роях; дозволяють

враховувати фізичні та енергетичні параметри середовища. Такі властивості роблять гібридну маршрутизацію фундаментальною основою для подальшої побудови інтелектуальної підсистеми управління роєм БПЛА.

2.3 Методи прийняття рішень у децентралізованих мережах

В мережах *FANET*, з вищезазначеним рівнем мобільності, процес прийняття рішення є децентралізованим, відсутність сталої інфраструктури, брак стабільності, не дають можливості використовувати окремий єдиний центр рішень. Кожен БПЛА має здатність аналізувати стан свого найближчого локального оточення, стану каналу, стану сусідніх вузлів, рівень збереження вторинної енергії та якість зв'язку для прийняття рішення про ретрансляцію пакетів, варіант маршруту або перебудови існуючих шляхів. В цілому метод дії формує самоупорядковану систему управління мережею, у якій стабільність роботи всієї мережі визначаються сумою ефективності локальних рішень окремих вузлів. Формально, в початковий момент часу *FANET* може бути представлена у вигляді динамічного графа (відношення 2.9).

$$G(t) = (V(t), E(t)), \quad (2.9) [33]$$

де $V(t)$ – множина БПЛА, а $E(t)$ – множина бездротових каналів, які існують між вузлами у поточному часовому інтервалі. При цьому рішення приймаються на основі локального вектора стану (див. Формулу 2.10).

$$s_i(t) = (x_i, y_i, z_i, v_i, E_i, SNR_{ij}, N_i), \quad (2.10) [33]$$

де координати (x_i, y_i, z_i) визначають положення БПЛА у просторі, v_i – його швидкість, E_i – рівень енергії, SNR_{ij} – відношення сигнал/шум до сусіднього вузла, а N_i – множина доступних сусідів. На основі цього вектора вузол локально ухвалює рішення щодо подальшої маршрутизації. Узагальнений цикл локального

прийняття рішень у децентралізованій *FANET*-системі схематично подано на рисунку 2.6 у вигляді послідовності етапів сприйняття стану, оцінки якості каналу та вибору наступного переходу.

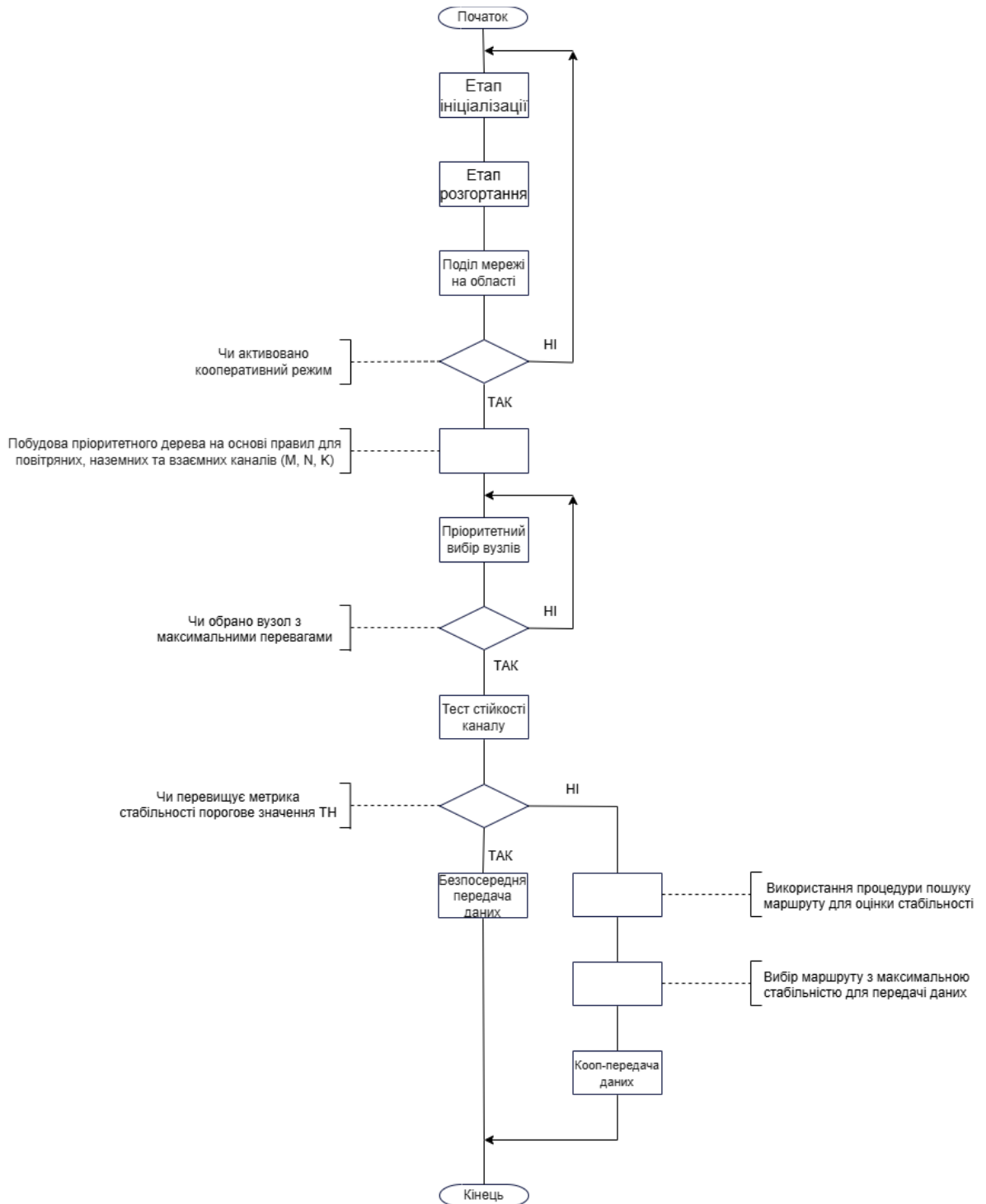


Рисунок 2.6 – Узагальнений цикл локального прийняття рішень у децентралізованій *FANET*-системі [33]

У сучасних роботах простежується чітка тенденція відмови від складних централізованих схем керування на користь порогових та евристичних децентралізованих алгоритмів з високою обчислювальною стабільністю та низькими енергетичними витратами. Зокрема, у дослідженнях [21] та [29] показано, що перебудова маршруту у *FANET* доцільна лише за досягнення критичних значень параметрів каналу або рівня енергії, що формалізується у вигляді логічного правила 2.11.

$$RebuildRoute = \begin{cases} 1, & SNR < SNR_{min} \vee E < E_{min}, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (2.11) [29]$$

Цей механізм допомагає уникнути того, щоб маршрути постійно переналаштовувались, і це суттєво зменшує загальний керуючий трафік. Продемонстровані в сучасних дослідженнях тестування в *NS-3* демонструє, що в умовах, коли БПЛА летять на швидкості більше 30 м/с, порогова маршрутизація зменшує варіації маршрутів від 18 до 25%, а також стабілізує затримку в умовах розривів.

Ще один важливий момент у вирішенні *FANET*-задач – алгоритми, які дозволяють дронам узгоджувати між собою параметри руху та мережевих ролей у рої. У таких алгоритмах кожен вузол коригує свої параметри на основі значень сусідніх вузлів за законом 2.12.

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + j \in N_i \sum a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)), \quad (2.12) [34]$$

де x_i – керуючий параметр : (напрямок руху, роль у мережі, швидкість), a_{ij} – коефіцієнти взаємного впливу. У результаті механізм колективної узгодженості дозволяє рою автоматично відновлювати форму та топологічну структуру після випадіння окремих БПЛА, що показано на рисунку 2.7 .

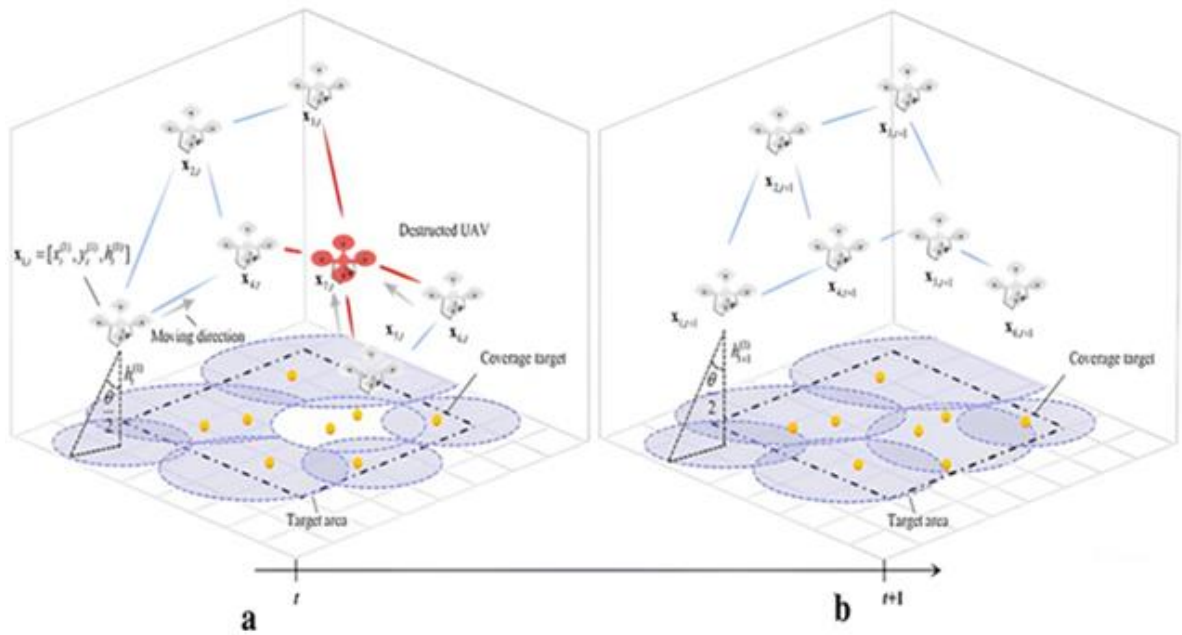


Рисунок 2.7 – Просторова перебудова топології *FANET* після втрати одного з БПЛА: *a* – початковий стан; *b* – відновлений стан на момент $t+1$ після відмови вузла [34]

У проаналізованих дослідженнях наведено приклади як використовують *consensus*–алгоритми, що дає змогу зменшити затримки керування та підвищити стійкість формацій до локальних розривів зв’язку. Для розподілу ролей у рої, зокрема вибору *backbone*–вузлів, ретрансляторів або сенсорних БПЛА, у *FANET* використовують аукціонні та торгівельні механізми [35]. Тоді кожен вузол обчислює власну вартісну функцію 2.13.

$$C_i = \alpha E_i + \beta d_i + \gamma L_i, \quad (2.13) [34]$$

де E_i рівень енергії, d_i – відстанню до важливих вузлів або наземної станції, а L_i – поточне мереже навантаження. Система бере вузол з найменшим C_i і доручає йому основні мережеві завдання. Подібні механізми, як досліджено у [34], допомагають зменшити енергоспоживання *FANET* і покращити доставку пакетів в межах 12% у порівнянні з випадковим розподілом ролей.

Отже, сучасні підходи до прийняття рішень в *FANET* мережах відходять від глобальної оптимізації, а на локальних евристичних, механізмах узгодження, порогових правилах та біоінспірованих принципах. Вони забезпечують адаптацію рою до розривів зв'язків, змін щільності вузлів і жорстких енергетичних обмежень без потреби централізованого керування. Власне ці методи і становлять теоретичний фундамент для системи управління роєм дронів.

Висновки до розділу

У другому розділі сформовано теоретичну основу для подальшої побудови та дослідження інтелектуальної підсистеми управління роєм БПЛА в умовах нестабільних мереж *FANET*. Розглянуті моделі мобільності, просторові характеристики мережі та типи динамічних топологій дають можливість досить точно описати реальні процеси взаємодії безпілотних літальних апаратів у тривимірному просторі з урахуванням високої швидкості руху, змін висоти та несталості радіоканалів.

На основі моделі мобільності Гаусса–Маркова та тривимірного опису положення БПЛА з'ясувалося, що найважливішою є саме просторово-часова динаміка вузлів визначає характер формування маршрутів, ймовірність зв'язності та частоту розривів у *FANET*. Аналітичні залежності ймовірності зв'язку від відстані та щільності розміщення вузлів що й підтверджує – геометричні та фізичні параметри справді критично важливі середовища у забезпеченні стійкості мережі. Проаналізовано основні типи динамічних топологій – зіркоподібну, сітчасту та кластерну, показано їхній вплив на надійність доставки, енергоспоживання та масштабованість рою.

Найбільше уваги приділено гібридним алгоритмам маршрутизації, які поєднують швидкодію проактивних протоколів і енергоефективність реактивних підходів. Показано, що в умовах високої мобільності та змінної щільності вузлів саме гібридні механізми дозволяють досягати компромісу між затримками,

навантаженням на канал і автономністю БПЛА. Біоінспіровані методи та кросрівневі підходи доповнюють гібридну маршрутизацію, дозволяючи адаптувати рішення до поточного стану каналу, рівня енергії та якості зв'язку.

У підрозділі, присвяченому методам прийняття рішень у децентралізованих мережах, стало очевидно – централізоване управління не діє для *FANET* та показано, що ефективність функціонування рою визначається сукупністю локальних рішень окремих вузлів. Порогові правила маршрутизації, механізми колективної узгодженості, аукціонні методи розподілу ролей і біоінспіровані алгоритми є основою для сучасних децентралізованих систем керування. Продемонстровано, що такі підходи забезпечують самовідновлення топології, стійкість до відмов вузлів і адаптацію до жорстких енергетичних обмежень без потреби глобальної координації.

Отже, в другому розділі створено цілісну теоретичну базу для подальшої розробки та програмної реалізації інтелектуальної підсистеми управління роєм БПЛА. Отримані положення щодо моделей мобільності, гібридної маршрутизації та децентралізованого прийняття рішень безпосередньо використовуються в наступному розділі при побудові архітектури системи, описі алгоритмів її функціонування та моделюванні роботи *FANET* у різних сценаріях.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОТОТИПУ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ *FANET*

3.1 Архітектура гібридної системи маршрутизації

FANET мережі – безінфраструктурні мережі, у яких безпілотні літальні апарати формують децентралізовану динамічну систему зв'язку з високою швидкістю зміни топології, обмеженими енергетичними ресурсами та тривимірною мобільністю. З огляду на це, створено симуляційний прототип гібридної *FANET*-системи, призначений для дослідження ефективності *rule-based* адаптивної маршрутизації в роях БПЛА.

Архітектура прототипу побудована за модульним принципом і включає сукупність взаємопов'язаних компонентів, які моделюють рух дронів, бездротовий зв'язок, маршрутизацію, споживання енергії та збирають статистику. Загальну структуру показано на рисунку 3.1.

Моделювання проходить у тривимірному просторі з визначеними границями, який у різних сценаріях становить від 600×600×100 м до 1300×1300×100 м. У межах цього простору випадковим чином ініціалізуються БПЛА із заданими параметрами швидкості, напрямку руху, залишкової енергії та радіуса зв'язку. Симуляція виконується у дискретному часі з фіксованим часовим кроком, на кожному з яких відбувається оновлення позицій дронів, перебудова топології мережі та виконання процедур маршрутизації.

Кожен БПЛА в архітектурі системи розглядається як автономний мережевий вузол *FANET*, який одночасно може виконувати ролі джерела, приймача та ретранслятора даних.

Кафедра КСМ				ДУ«КАІ» 25 42 14 003 ПЗ			
Виконав	Могильний П. Ю.			Розробка прототипу гібридної системи <i>FANET</i>	Літера	Аркуш	Аркушів
Керівник	Гузій М. М.				Н	48	85
Консульт.					123 М-123-24-1-КС		
Норм. контр.	Фоміна Н.Б.						
Зав. Каф.	Іскренко Ю.Ю.						

Структурна модель БПЛА включає координати положення в просторі, ідентифікатор, поточну швидкість, напрямок руху, рівень залишкової енергії та чергу пакетів. Рух дронів описується моделлю Гаусса–Маркова, це дає часову кореляцію швидкостей і допомагає створювати плавні траєкторії, характерні для реального польоту БПЛА в *FANET*–середовищі. Оновлення координат здійснюється у векторному вигляді, що забезпечує повноцінне тривимірне моделювання.

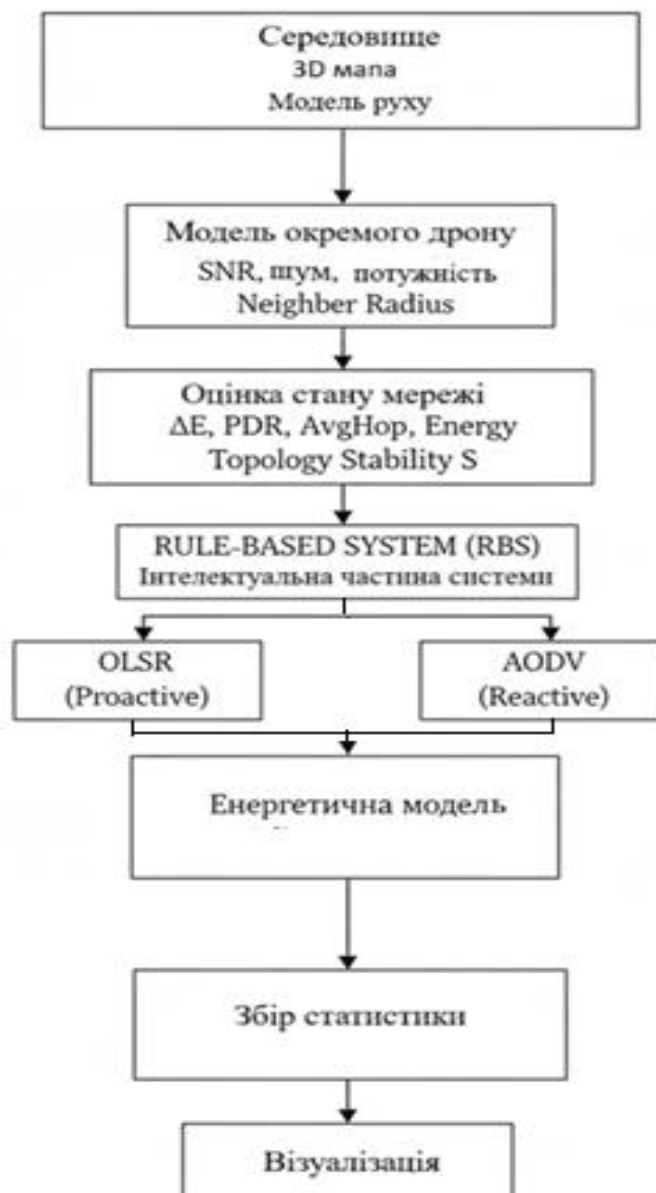


Рисунок 3.1 – Збільшена архітектура прототипу

Комунікаційний рівень системи ґрунтується на бездротовій моделі каналу із заданою потужністю передавача, рівнем шуму, частотою несучої та пороговим значенням SNR . Зв'язок між двома БПЛА встановлюється за умови, що відстань між ними не перевищує радіусу сусідства. На основі цієї умови на кожному кроці формується граф зв'язності мережі, де вершинами є БПЛА, а ребра відповідають активним бездротовим каналам.

Основна частина архітектури – гібридний маршрутизатор на основі правил, який інтегрує проактивний протокол *OLSR* та реактивний протокол *AODV*. Замість машинного навчання ми застосовуємо прості, зрозумілі правила для вибору протоколу, що базуються на оцінці стабільності поточної топології *FANET*.

Для цього на кожному часовому кроці обчислюється метрика зміни структури графа зв'язності шляхом аналізу кількості зниклих і новостворених ребер порівняно з попереднім станом мережі. Якщо рівень стабільності перевищує заданий поріг, система переходить у режим проактивної маршрутизації *OLSR*, інакше активується реактивний механізм *AODV*.

Важливою частиною є також енергетична модель. Кожному БПЛА на старті призначається початковий запас енергії, який поступово зменшується внаслідок передачі, прийому та ретрансляції пакетів. Витрати енергії пов'язані з потужністю передавача, тривалістю передавання та кількістю мережевих переходів. Таким чином, система дозволяє досліджувати не лише показники якості обслуговування, а й енергоефективність гібридної маршрутизації.

Архітектура також включає модуль збору статистики, який у процесі симуляції накопичує середні значення коефіцієнта доставки пакетів (*PDR*), середньої кількості переходів, витрат енергії та варіації цих показників у межах багаторазових незалежних прогонів.

Отримані дані використовуються для формування підсумкових таблиць і подальшого порівняльного аналізу протоколів *OLSR*, *AODV* та гібридного підходу.

Щоб показати динаміку *FANET*, ми використовуємо анімовану 3D-візуалізацію руху БПЛА та активних маршрутів передачі, що дозволяє наочно відслідковувати формування кластерів, розриви зв'язків, перебудову маршрутів і зміну топології в часі. Візуалізація використовується як інструмент верифікації коректності роботи алгоритмів та якісний засіб аналізу поведінки системи у різних сценаріях.

Підсумовуючи, архітектура поєднує різні моделі – від 3D руху дронів БПЛА, бездротового каналу, детермінованої *rule-based* гібридної маршрутизації, енергоспоживання та збору статистичних метрик. Це забезпечує можливість комплексного дослідження залежності продуктивності *FANET* від характеру руху, щільності рою, радіуса зв'язку та ступеня динамічності топології.

3.2 Алгоритм функціонування інтелектуальної підсистеми управління роєм БПЛА

Алгоритм для управління роєм дронів використовує змішаний підхід з правилами, яка комбінує *OLSR* і *AODV* протоколи – перший працює наперед, другий реагує на потребу залежно від поточного стану топології.

Створено чіткі правила, за якими система приймає рішення, що використовують параметри мережі, які можна виміряти: стабільність зв'язків, середню швидкість вузлів, щільність сусідів і залишкову енергію БПЛА. Завдяки цьому система поводить більш передбачувано, менше навантажує процесор і працює стабільніше в симуляціях.

Алгоритм працює по циклах – кожен цикл займає однаковий час, на кожному кроці ми оновлюємо позиції вузлів, будуємо граф мережі, перевіряємо стабільність топології, обираємо протокол маршрутизації і передаємо пакети.

На кожному кроці симуляції оновлюється вектор позиції для кожного БПЛА, що показує, де саме знаходиться вузол у 3D-просторі. Координати оновлюються згідно з обраною моделлю руху, при цьому БПЛА рухаються

швидко і можуть різко змінювати напрямок, що безпосередньо впливає на формування та розрив радіозв'язків.

Після оновлення позицій формується орієнтований граф мережі (див. формулу 2.9). Радіозв'язок між двома дронами та вважається наявним, якщо виконується умова 3.1.

$$d_{ij}(t) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} < R, \quad (3.1)$$

де R – радіус стабільного зв'язку. Виходячи з цього, складається список сусідніх вузлів для кожного вузла та визначаються можливі багатходові маршрути.

Щоб вибрати який протокол маршрутизації буде активним, використано метрику стабільності топології (див. формулу 3.2), вона показує, наскільки часто змінюється граф *FANET*.

$$S = 1 - \frac{|E_t \Delta E_{t-1}|}{|E_t| + |E_{t-1}|}, \quad (3.2)$$

де $E(t) \Delta E(t - 1)$ – симетрична різниця множин ребер, що відображає кількість нових та втрачених з'єднань за один часовий крок. Чим більше значення $S(t)$, тим стабільнішою вважається топологія мережі.

Прийняття рішення щодо вибору активного протоколу виконується на основі чітко визначених правил (див. формули 3.3 та 3.4)

$$S(t) \geq S_{thr} \text{ та } \bar{v}(t) \leq v_{thr}, \quad (3.3)$$

то активується *OLSR* як більш ефективний для стабільних та щільних топологій.

$$S(t) < S_{thr} \text{ або } \bar{v}(t) > v_{thr}, \quad (3.4)$$

то активується *AODV*, що краще працює в умовах частих розривів зв'язків.

Загалом підсистема працює по такому циклу (див. рисунок 3.2).

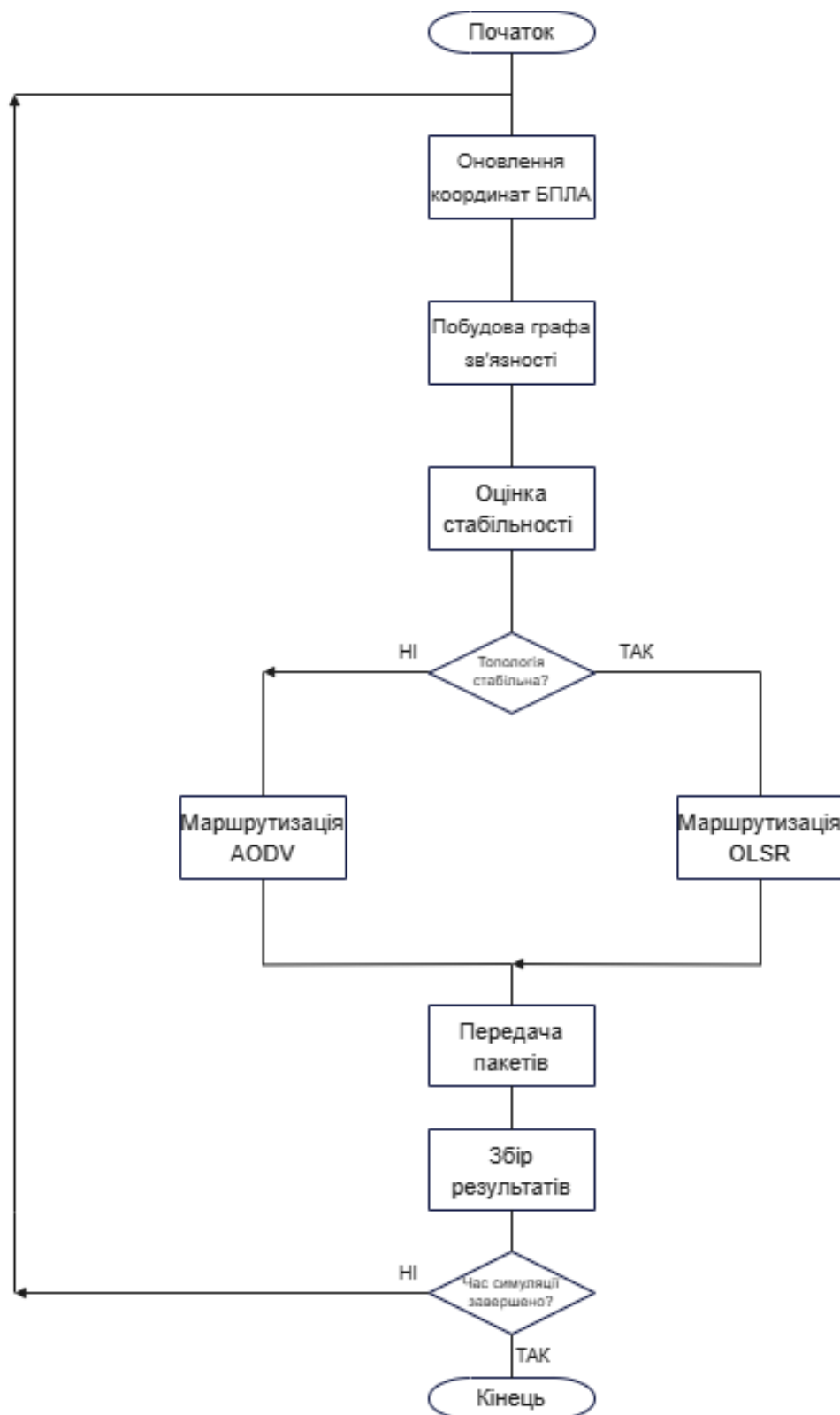


Рисунок 3.2 – Узагальнений цикл роботи *rule-based* підсистеми управління *FANET*

Також треба врахувати середній рівень енергії, що залишилась у вузлах $E(t)$. У разі його зниження система автоматично перемикається на реактивний режим, що зменшує обсяг керуючого трафіку.

Таким чином, інтелектуальна підсистема в цьому випадку реалізована у вигляді адаптивного *rule-based* перемикача між *OLSR* та *AODV*, це дає змогу збалансувати затримку, *PDR* і споживання енергії.

Коли вже обрано протокол, пакети починають передаватися між вузлами. Для кожного пакета фіксується: кількість переходів (*hop count*), час доставки, факт успішної доставки або втрати, витрати енергії на передавання та ретрансляцію.

Симулятор бере ці дані і рахує середні показники *PDR*, затримки, середньої довжини маршруту та енергоспоживання, щоб потім проаналізувати, наскільки добре працює гібридна система.

Спочатку оновлюються координати дронів, потім будується граф мережі, оцінка стабільності топології, вибір *OLSR* чи *AODV* за правилами, передача пакетів і збір статистики. І так по циклу, допоки симуляція не закінчиться.

3.3 Сценарії моделювання та умови проведення експериментів

Щоб повноцінно оцінити, наскільки ефективна *rule-based* гібридна підсистема маршрутизації в *FANET* реалізовано й досліджено три основні сценарії роботи мережі: стабільний, нестабільний та деградованої–зв'язності. Ці сценарії ми обрали тому, що потрібно було перевірити, як працює алгоритм в принципово різних умовах зв'язності, мобільності та щільності вузлів, це покриває практично всі реальні випадки, коли використовуються рої дронів.

Для кожного сценарію запущено симуляцію в *3D*-просторі з урахуванням мобільності БПЛА, радіусу зв'язку, обмеженого часу життя пакетів та змішаного підходу до перемикання між *OLSR* і *AODV* протоколами, залежно від того, наскільки стабільна мережева топологія. Головне, що виміряно, це кількість пакетів, що дійшло до цілі (*PDR*), через скільки вузлів вони проходили в

середньому (для визначення затримки), і скільки енергії витрачали дрони. Кожен сценарій протестовано 10 разів окремо, а потім розраховано середні результати.

Стабільний сценарій оцінює, як рої безпілотників зберігають відносно спокійну топологію протягом всього часу моделювання, що регулярно спостерігається у випадку патрулювання, території або спостереження, де траєкторії руху дронів змінюються повільно та не руйнують зв'язків. В такому випадку працюємо з невеликою зоною моделювання та помірні швидкості руху БПЛА, що забезпечує високу щільність сусідів у межах радіусу зв'язку.

За таких умов *rule-based* перемикач більшість часу симуляції класифікує топологію як стабільну, внаслідок чого домінуючим стає протокол *OLSR*. Завдяки тому, що таблиці маршрутизації постійно оновлюються, вдається досягти мінімальних затримок при передачі та високий коефіцієнт доставки пакетів. Цей сценарій використано як базовий – він показує, наскільки добре система може працювати в хороших умовах.

Нестабільний сценарій – найскладніший випадок для мережі та моделює ситуації, коли рій активно маневрує, веде бойові дії або обходить перешкоди або польоту в умовах сильних зовнішніх впливів. Для цього сценарію задаються високі швидкості руху БПЛА, збільшений простір симуляції та обмежений радіус зв'язку, що призводить до частих розривів маршрутів і різких змін графа з'єднань.

Коли мережа працює в таких умовах, стабільність топології зазвичай падає нижче встановленого порогу, тому система на основі правил автоматично перемикає мережу на реактивний режим із використанням протоколу *AODV*. Завдяки цьому можна швидко відновити маршрути, коли вони ламаються, правда, при цьому збільшуються затримки і падає *PDR*. Ось тут і видно головну перевагу гібридного підходу порівняно з фіксованим використанням лише одного протоколу.

Режим деградованої зв'язності моделює ситуацію, за якої кількість БПЛА залишається незмінною, проте значно зростає площа симуляційного простору. Через це щільність вузлів падає досить різко, що призводить до періодичної або

фрагментарної втрати зв'язності між дронами. Власне, такий режим дозволяє нам моделювати розріджені *FANET*-мережі, які часто застосовують, скажімо, для моніторингу великих площ, на морі, на кордоні чи під час розвідки на дальніх дистанціях.

У цьому випадку мережа перебуває у граничному стані зв'язності, коли маршрути з багатьма пересиланнями то з'являються, то зникають – працюють нестабільно. Гібридний алгоритм на правилах в таких умовах має справлятися з постійними розривами з'єднань і фактичної відсутності сталої топології. Перемикання між *OLSR* та *AODV* відбувається на основі локальної щільності сусідів, це дає змогу хоч якось підтримувати роботу системи навіть за критичного рівня втрат пакетів. Цей режим добре показує, де саме проходять межі можливостей застосовності *FANET* як класу мереж.

У дослідженні проаналізовано три основні режими роботи *FANET*: стабільний, нестабільний та режим деградованої зв'язності, зумовлений збільшенням розмірів області симуляції. Аналізуючи ці сценарії разом, можна детально протестувати роботу *rule-based* гібридної підсистеми маршрутизації в різних умовах – від найкращих до найгірших: від відносно стабільних мереж з хорошим *PDR* до дуже нестабільних ситуацій із фрагментованою топологією. Це дає нам надійну базу для порівняння протоколів *OLSR*, *AODV* та гібридного підходу.

3.4 Метрики оцінювання підсистеми гібридної маршрутизації

Для оцінки того, наскільки добре працює гібридна *rule-based* підсистема маршрутизації в *FANET*, використано кількісні метрики, щоб всебічно оцінити надійність передачі даних, кількість мережевих ресурсів, що витрачається і яке є навантаження на структуру маршрутизації. Увагу зосереджено на трьох ключових метриках: коефіцієнт доставки пакетів, кількість в середньому переходів між вузлами і середні енергетичні витрати вузлів.

Ці показники виявилися найбільш ефективними при аналізі *FANET* в умовах високої мобільності, обмеженої зв'язності та енергетичних обмежень. Коефіцієнт доставки пакетів вважається головним критерієм надійності зв'язку в *FANET* і показує частку успішно доставлених пакетів від загальної кількості переданих. Розраховується цей показник за формулою 3.5.

$$PDR = \frac{N_{received}}{N_{sent}}, \quad (3.5)$$

де $N_{received}$ – кількість пакетів, що були успішно доставлені до вузлів призначення, а N_{sent} – загальна кількість переданих пакетів у мережі. Високе значення PDR свідчить про стабільність маршрутів, достатню зв'язність графа та коректну роботу алгоритмів маршрутизації. Зниження цього показника характерне для сценаріїв з частими розривами зв'язків, високою швидкістю руху БПЛА та обмеженим радіусом зв'язку.

Ще одна важлива метрика – середня кількість переходів між вузлами, вона показує, наскільки складними є маршрути в *FANET* з топологічної точки зору. Рахується вона просто – беремо довжини всіх успішних маршрутів і знаходимо середнє арифметичне (див. формулу 3.6).

$$AvgHop = \frac{1}{N_{paths}} \sum_{i=1}^{N_{paths}} H_i, \quad (3.6)$$

де H_i – кількість переходів у i -му маршруті, а N_{paths} – кількість успішно використаних маршрутів. Ця метрика має безпосередній зв'язок із затримкою передачі даних, оскільки кожен додатковий перехід між вузлами вносить часову затримку на прийом, обробку та повторну передачу пакета. У рамках симуляції фізичні затримки не вимірювались безпосередньо у мілісекундах, а оцінювались опосередковано через кількість переходів, це стандартний метод, що часто застосовується при дискретно-подієвому моделюванні мереж. Таким чином, збільшення $AvgHop$ означає, що наскрізна затримка також зростає.

Третьою базовою метрикою є середні енергетичні витрати вузлів, які показують, як ефективно витрачаються обмежені ресурси батареї БПЛА в процесі передачі даних і підтримки мережевої зв'язності. У рамках симуляції енергоспоживання кожного вузла формується як сума витрат на передавання, приймання та обслуговування маршрутів (див. формулу 3.7).

$$E_{consumed} = E_{tx} + E_{rx} + E_{ctrl}, \quad (3.7)$$

де E_{tx} – енергія, витрачена на передавання пакетів, E_{rx} – енергія на їх приймання, а E_{ctrl} – витрати, зумовлені обробкою керуючих повідомлень протоколів маршрутизації. Усереднене значення енергоспоживання по мережі визначається як відношення 3.8.

$$AvgEnergy = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i, \quad (3.8)$$

де N – кількість БПЛА у рої, а E_i – сумарні витрати енергії i -го вузла за час симуляції. Ця метрика дуже важлива для *FANET*, оскільки саме енергетичні обмеження впливають на те, як довго рій може працювати самостійно і наскільки він ефективний на практиці у практичних застосуваннях.

Якщо взяти ці три метрики, то можна покрити всі основні моменти роботи *FANET*: надійність передачі інформації (*PDR*), топологічну складність і затримки (*AvgHop*) та ресурсну ефективність (*AvgEnergy*). Коли аналізуємо всі ці показники разом, то можемо правильно порівняти класичних протоколів *OLSR*, *AODV* та розробленого гібридного *rule-based* підходу в різних сценаріях моделювання, про що йтиметься далі.

3.5 Реалізація підсистеми

В цій роботі створено програмний прототип для симуляції гібридної системи маршрутизації на основі правил, щоб протестувати, як працює *FANET*–

мережа при різній кількості вузлів і змінах в структурі мережі. Прототип побудований модульно – кожна частина відповідає за свою функцію.

Обрано *Python* для програмування, бо він ідеально підходить для швидкого прототипування – якраз те, що треба, роботи з матричними обчисленнями, графами та візуалізацією. Для обчислювальних операцій та роботи з масивами використано бібліотеку *NumPy*, з нею можна легко векторизувати всі розрахунки – координати, відстані, енергетичні витрати. Побудова та аналіз графів зв'язності *FANET* здійснюється за допомогою бібліотеки *NetworkX*, вона дозволяє реалізувати логіку маршрутів з багатьма переходами, аналіз компонент зв'язності та середню кількість переходів.

Для зображення руху дронів, створення анімацій та ілюстрацій топології використовується бібліотека *Matplotlib* разом із інструментом *FuncAnimation*, що дозволяє створити тривимірну динамічну сцену руху рою. Створення підсумкових таблиць результатів та обробка серій тестів виконується за допомогою *Pandas*. На рисунку 3.3 графічно зображені логотипи основних технологій.

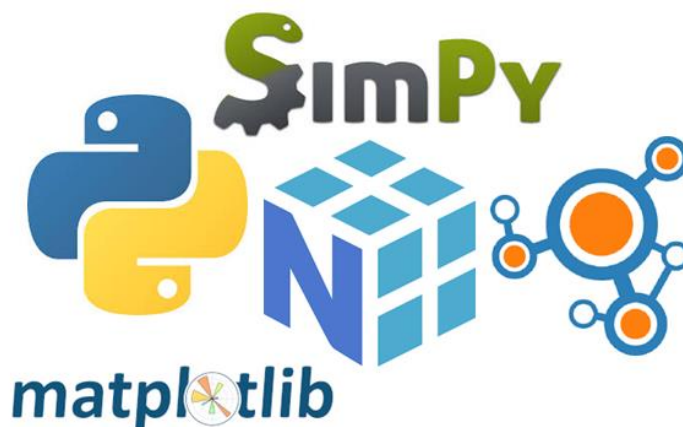


Рисунок 3.3 – Логотипи використаних технологій

Програмна система має модульну структуру та складається з таких основних компонентів:

1. Модуль генерації руху БПЛА;

2. Модуль побудови графа зв'язності *FANET*;
3. Модуль реалізації протоколів *OLSR* та *AODV*;
4. *Rule-based* блок перемикання режимів маршрутизації;
5. Модуль енергоспоживання;
6. Модуль збору статистики;
7. Модуль візуалізації.

Сценарії симуляції реалізовано через окремий конфігураційний модуль, у якому визначаються:

1. Розміри простору симуляції;
2. Кількість БПЛА;
3. Діапазон швидкостей;
4. Параметри радіозв'язку;
5. Тривалість симуляції.

Важливі основи конфігураційного файлу наведено в додатку А, а фрагменти реалізація протоколів та експериментів в додатках Б та В.

У межах цієї роботи реалізовано та фактично протестовано три сценарії: стабільна мережа, нестабільна мережа з розривами, режим деградованої зв'язності.

Візуальні приклади руху БПЛА та розподілу зв'язків у кожному сценарії представлені на рисунках. Рисунок 3.4 – стабільний сценарій, рисунок 3.5 – нестабільний сценарій.

У процесі кожного прогону симуляції система автоматично накопичує основні показники, зокрема кількість згенерованих і доставлених пакетів, сумарну кількість переходів між вузлами для обчислення середнього числа хопів, а також залишкову енергію кожного БПЛА після завершення сценарію.

Після виконання серії незалежних прогонів симулятор здійснює усереднення цих значень, формуючи ключові метрики *AvgPDR*, *AvgHop* та *AvgEnergy*, які використовуються для порівняльного аналізу протоколів. Підсумкові результати автоматично структуруються у табличному форматі.

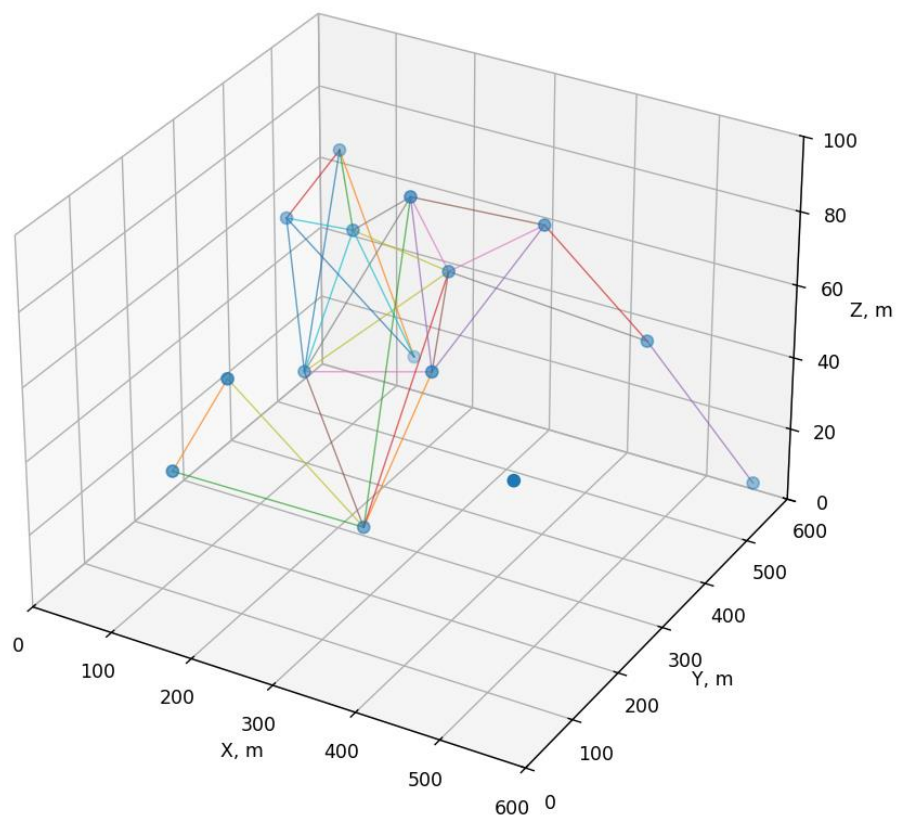


Рисунок 3.4 – Приклад руху та розподілу зв'язків в стабільному сценарії

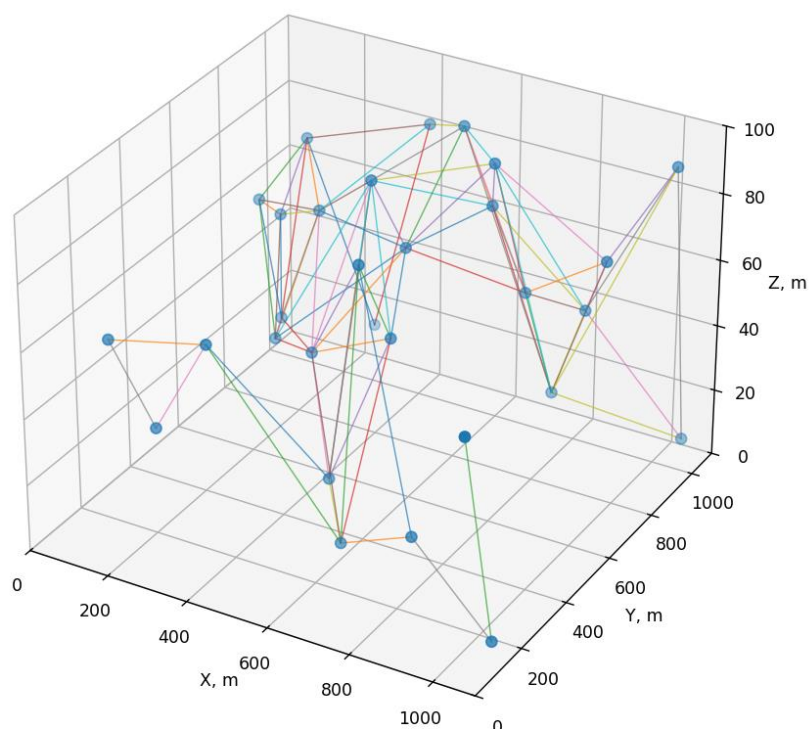


Рисунок 3.5 – Приклад руху та розподілу зв'язків в нестабільному сценарії

На рисунку 3.6 зображено режим деградованої зв'язності.

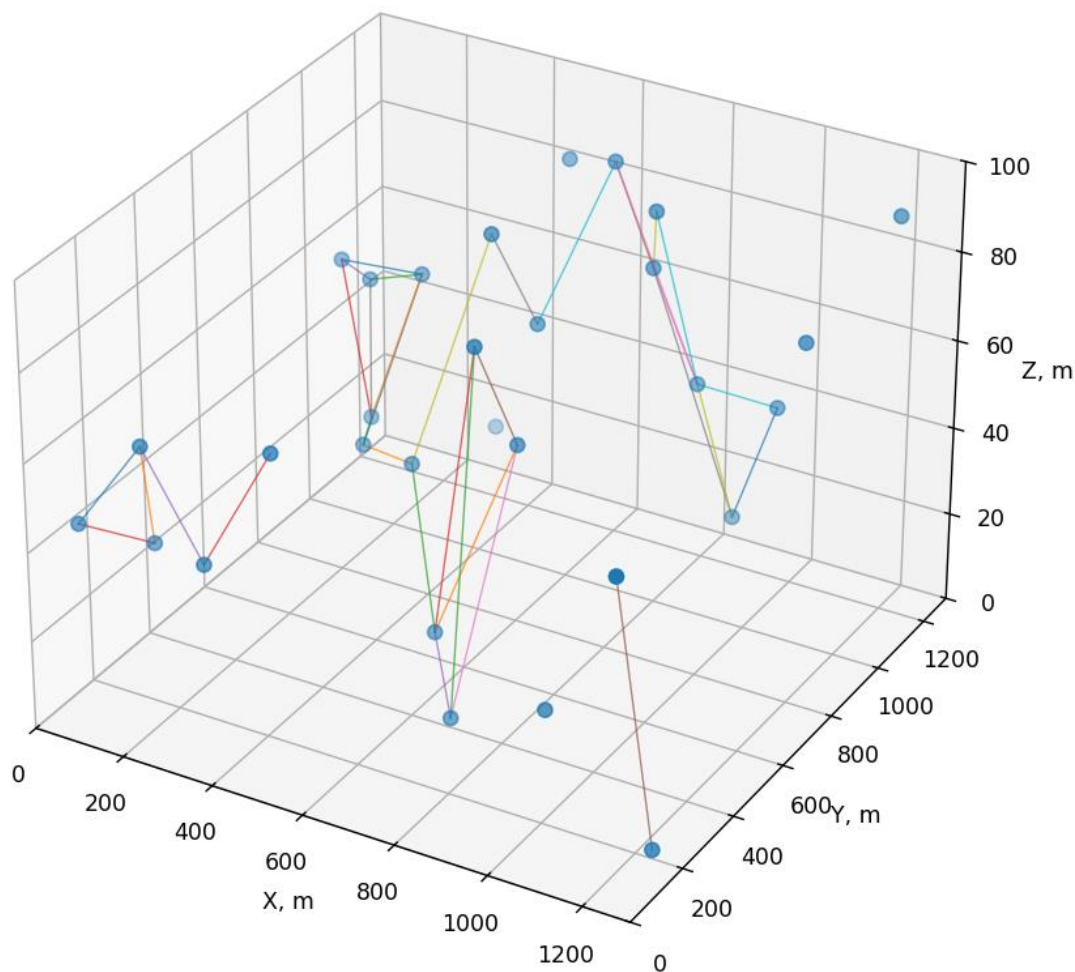


Рисунок 3.6 – Приклад руху та розподілу зв'язків в критичному сценарії

Повний програмний код симуляційного прототипу, включно з реалізацією моделі руху БПЛА, алгоритмами маршрутизації *OLSR* і *AODV*, *rule-based* механізмом перемикання між ними, а також модулями збору статистики та візуалізації, наведено у додатку А.

Файли конфігурації та параметри сценаріїв, які використовуються під час експериментів, подано у додатку Б, що забезпечує повну відтворюваність експериментів та можливість подальшого розширення системи.

Висновки до розділу

У третій частині побудовано та описано імітаційний прототип гібридної системи *FANET*. Запропонована архітектура дозволяє відтворювати реалістичні процеси зміни топології, формування маршрутів, погіршення зв'язності та енергоспоживання у роях БПЛА.

Розроблено алгоритм на основі згортки, який спирається на робочі процеси та показники стабільності, на яких заснований вибір маршруту, що дозволяє використовувати інтелектуальні підсистеми. У цьому розділі також описуються різні умови моделювання – режими стабільного, нестабільного та критичного сценарію – які охоплюють різні точки зору на роботу *FANET* та забезпечують фундаментальну основу для подальшої надійності експериментів.

Третій розділ надає докладний опис того, які метрики використовуються для характеристики якості зв'язку та ефективності мережі. Представлені особливості використання програмного забезпечення, вибору бібліотек та структури модуля конфігурації симуляцій, що гарантують згуртованість та масштабованість експерименту.

Таким чином, третій розділ формує повну методичну основу для моделювання та спеціального аналізу ефективності гібридних систем маршрутизації. Це дає основу для аналізу результатів моделювання та їх інтерпретації у наступному розділі.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОТОТИПУ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ *FANET*

4.1 Методика проведення експериментальних досліджень

Для розробки технології використано методологію комплексного моделювання. Він був використаний для всіх сцен моделювання на базі гібридної системи маршрутизації *FANET*, заснованої на правилах. У цьому методі правила використовувалися визначення параметрів простору моделювання, налаштування характеристик БПЛА, вибору протоколу маршрутизації, збору показників і усереднення результатів.

Усі експерименти проводилися серед тривимірного моделювання з кроком за часом $t = 1$ з. За підходами область моделювання була різноманітною:

1. Стабільний сценарій – 600 600 100 метрів;
2. Нестабільний сценарій – 1100×1100×100 метрів;
3. Критичний сценарій – 1300x1300x100 метрів.

Для кожного сценарію записано наведені нижче параметри (див. таблицю 2).

Початкові координати та рух дрону генерувалися не просто випадковим чином, а з використанням фіксованих положень генератора псевдовипадкових чисел (*seed*), що забезпечує повну відтворюваність експериментів. Для порівняння оцінювалися три протоколи. *OLSR* – активний протокол, який підтримує таблиці маршрутизації.

AODV – реактивний протокол, що створює маршрути на запит. Гібридний підхід – підсистема, що перемикається між *OLSR* та *AODV*.

<i>Кафедра КСМ</i>				ДУ«КАІ» 25 42 14 004 ПЗ				
<i>Виконав</i>	<i>Могильний П. Ю.</i>			<i>Дослідження прототипу гібридної системи FANET</i>	<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>	
<i>Керівник</i>	<i>Гузій М. М.</i>				<i>Н</i>	64	85	
<i>Консульт.</i>					<i>123 М-123-24-1-КС</i>			
<i>Норм. контр.</i>	<i>Фоміна Н.Б.</i>							
<i>Зав. Каф.</i>	<i>Іскренко Ю.Ю.</i>							

Експерименти за всіма протоколами проводилися за однакових умов, а результати усереднювалися. Тест проводився протягом п'яти незалежних запусків, а дослідження проводилося протягом десяти незалежних запусків.

Таблиця 2 – Параметри для кожного сценарію симуляції

Параметр	Стабільний	Нестабільний	Деградована зв'язність
Кількість БПЛА	15	30	30
Швидкість, м/с	8–25	90–150	90–150
Радіус зв'язку R , м	360	300	300
Час життя пакета	$10 \cdot 10^6$ тактів	$10 \cdot 10^6$ тактів	$10 \cdot 10^6$ тактів
Тривалість симуляції	$20 \cdot 10^6$ тактів	$20 \cdot 10^6$ тактів	$20 \cdot 10^6$ тактів

4.2 Аналіз результатів моделювання у вибраних сценаріях *FANET*

У спокійному режимі топологія змінюється повільно, а відстань між БПЛА зазвичай не перевищує радіусу зв'язку. Мережа утворює майже безперервно пов'язаний граф, що дозволяє маршрутам залишатися дійсними протягом тривалого часу (див. таблицю 3), створюючи відповідні умови для проактивної маршрутизації.

Таблиця 3 – Результати стабільного сценарію

Протокол	<i>AvgPDR</i>	<i>StdPDR</i>	<i>AvgHop</i>	<i>AvgEnergy (J)</i>
<i>OLSR</i>	0,863127	0,010903	1,944758	208612,95
<i>AODV</i>	0,866585	0,014116	2,272987	208612,91
Гібрид	0,863127	0,010903	1,944758	208612,95

У подібних ситуаціях системи, що ґрунтуються на правилах, майже завжди підтримують стабільність мережі, тому гібрид в режимі *OLSR*.

Усі підходи демонструють високий коефіцієнт доставки пакетів на рівні 86% (див. рисунок 4.1). *OLSR* та *HYBRID* демонструють найменшу кількість переходів (див. рисунок 4.2), оскільки проактивна таблиця дозволяє вибрати оптимальний шлях. *AODV* має більше переходів, але загальна якість передачі інформації не погіршується. Споживання енергії між протоколами практично однакове; це свідчить про легкий режим роботи мережі, з малою кількістю перебоїв.

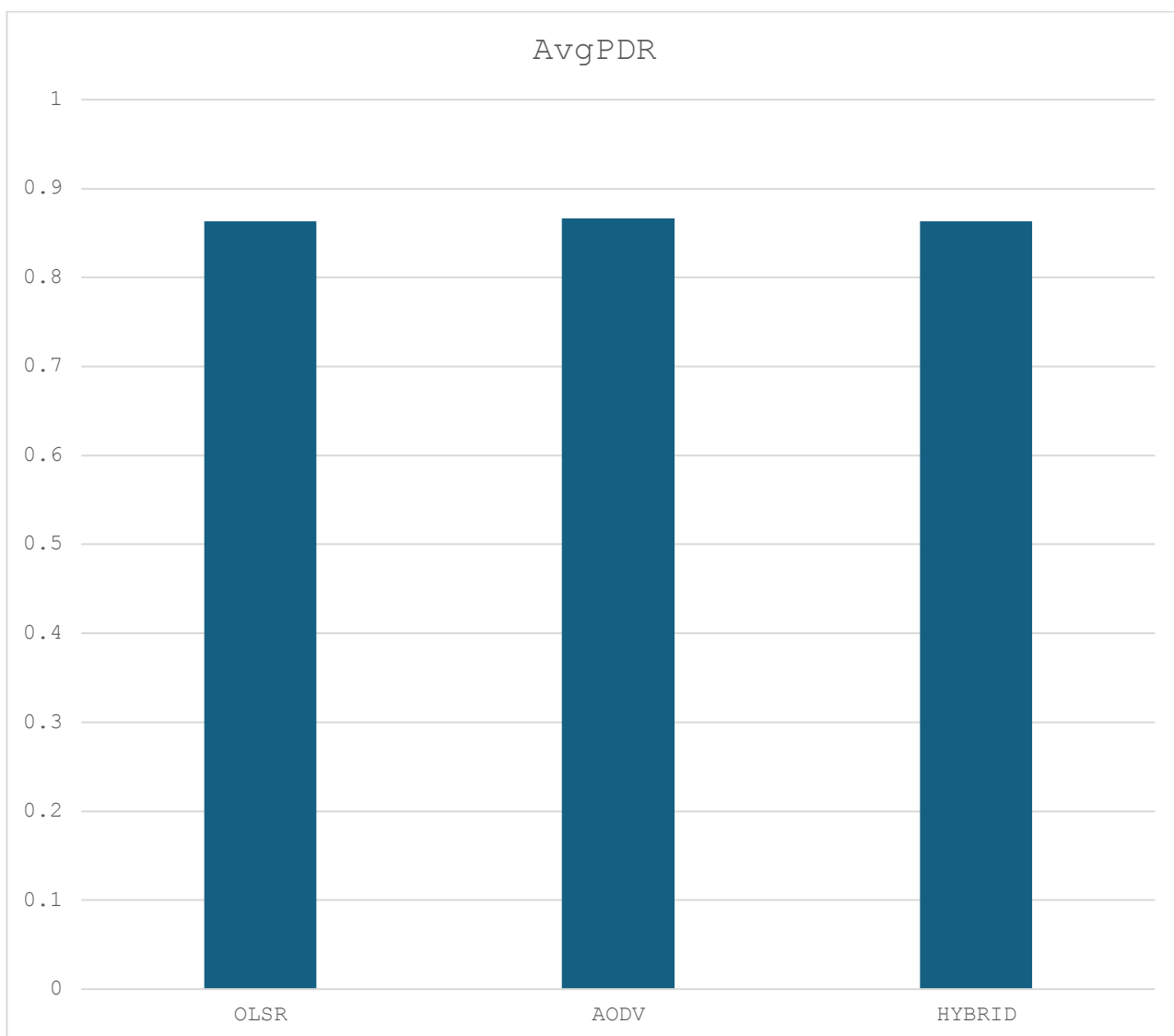


Рисунок 4.1 – Коефіцієнт доставки пакетів при стабільному сценарії

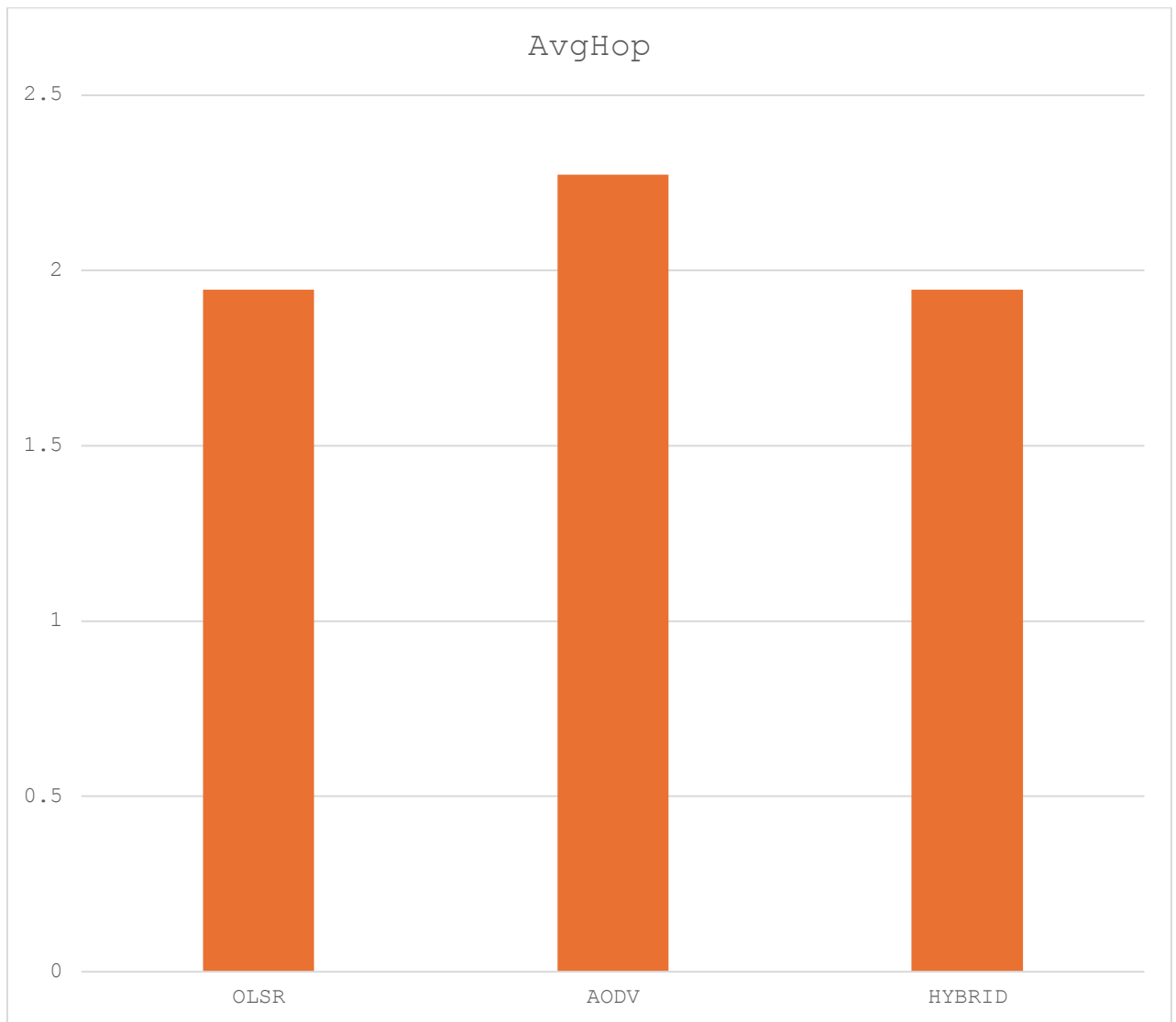


Рисунок 4.2 – Кількість переходів при стабільному сценарії

Спеціальний аналіз нестабільного ландшафту пов'язаний із підвищенням швидкості дронів та розширеною просторовою моделлю. Графіки зв'язності змінюються на кожному тимчасовому кроці, що призводить до появи вузьких місць на маршрутах та зниження коефіцієнтів доставки пакетів. У таких обставинах система, заснована на правилах, автоматично перемикається на *AODV*, але дозволяє час від часу використовувати *OLSR* у короткочасних стійких станах (див. таблицю 4).

Таблиця 4 – Результати нестабільного сценарію

Протокол	<i>AvgPDR</i>	<i>StdPDR</i>	<i>AvgHop</i>	<i>AvgEnergy (J)</i>
<i>OLSR</i>	0,425764	0,01737	3,746732	124775,31
<i>AODV</i>	0,403761	0,015839	3,865022	124775,29
<i>HYBRID</i>	0,427547	0,020882	3,767936	124775,3

За такого сценарію коефіцієнт доставки пакетів знижується приблизно до 40–43%, що є природним наслідком високої мобільності мережі. Гібридний підхід демонструє найкращий *PDR* серед трьох протоколів, так як він не ґрунтується на єдиній стратегії маршрутизації, а натомість адаптує її на основі стабільності топології (див. рисунок 4.3). Число переходів майже подвоюється відносно стабільного сценарію, що свідчить про топологічну зміну у мережі (див. рисунок 4.4). Споживання енергії також залишається незмінним, оскільки швидкість передачі однакова у всіх протоколах.

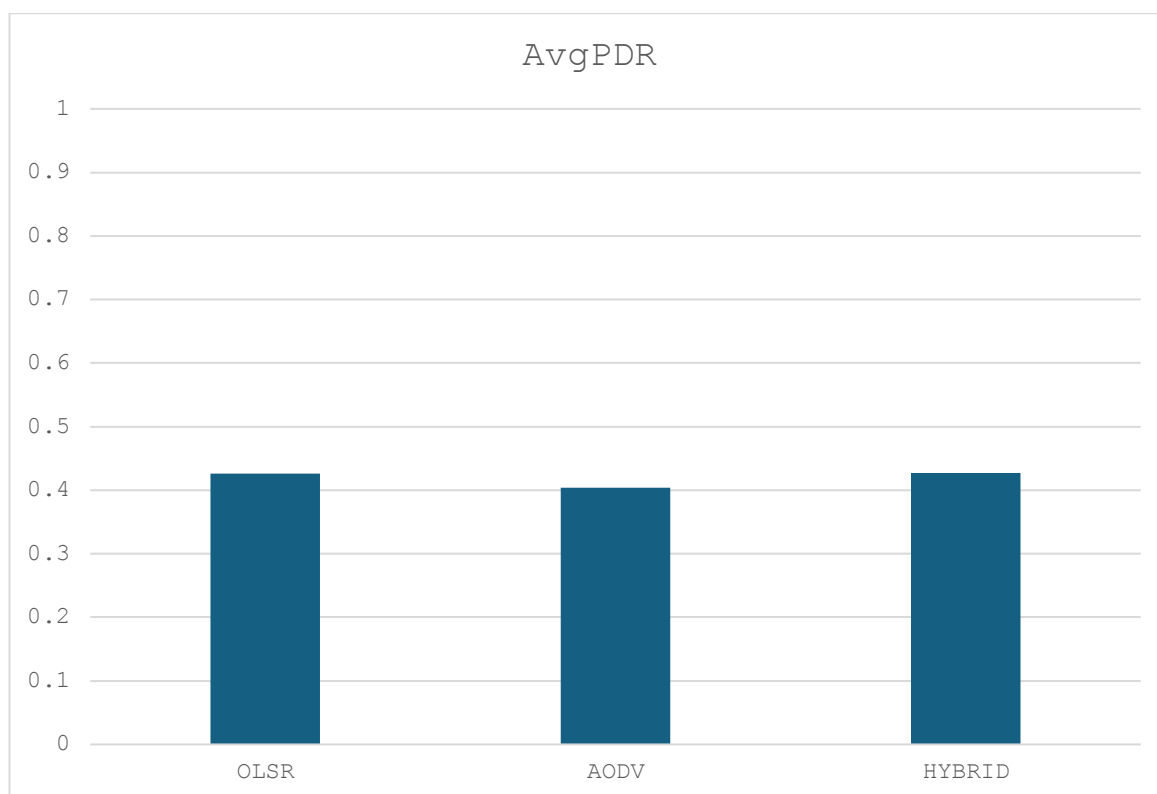


Рисунок 4.3 – Коефіцієнт доставки пакетів при нестабільному сценарії

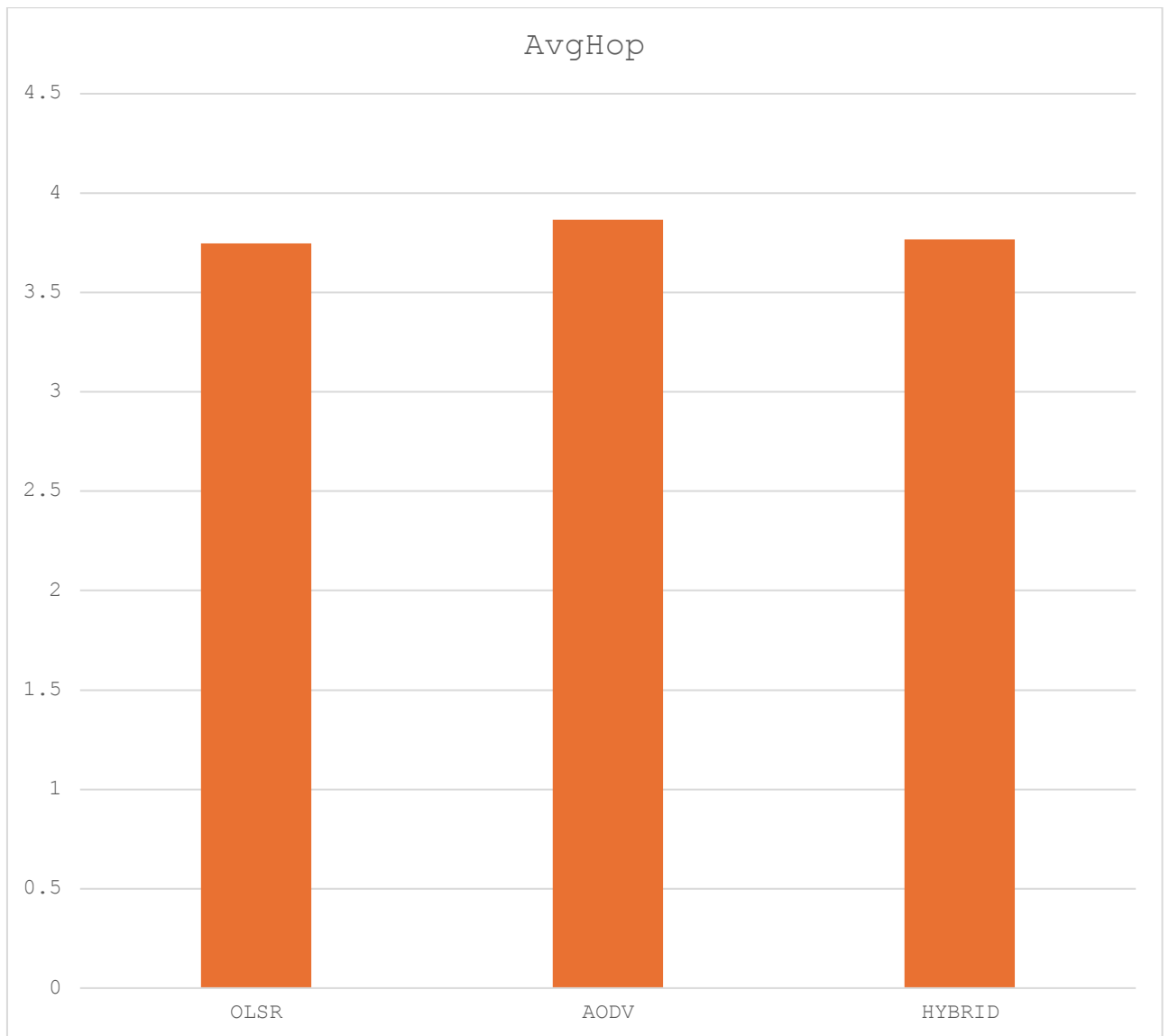


Рисунок 4.4 – Кількість переходів при нестабільному сценарії

У випадку деградованої зв'язності розмір простору моделювання збільшується, а кількість дронів залишається незмінною. Щільність мережі швидко знижується, і *FANET* працює на межі можливості підключення. Маршрути часто зникають, а мережа стає фрагментованою. Ефективніше в такій конкуренції працює реактивний підхід, оскільки він швидко адаптується до моментів появи доступних сусідів, зменшуючи втрати пакетів у топології мережі (див. таблицю 5).

Таблиця 5 – Результати критичного сценарію

Протокол	<i>AvgPDR</i>	<i>StdPDR</i>	<i>AvgHop</i>	<i>AvgEnergy (J)</i>
<i>OLSR</i>	0,259462	0,014383	2,965744	78546,22
<i>AODV</i>	0,283069	0,006354	3,569927	78546,18
<i>HYBRID</i>	0,267462	0,010177	2,943775	78546,21

У разі критичного сценарію значення коефіцієнта доставки пакетів знижується приблизно на від 26 до 28%. *AODV* демонструє високий *PDR*, що є перспективним результатом у ситуації, коли складно встановити стабільні маршрути (див. рисунок 4.5). Гібридний підхід працює краще, ніж проактивний, але поступається реактивній маршрутизації, оскільки значення стійкості топології рідко перевищує граничне значення, що іноді призводить до непотрібного перемикавання режимів (див. рисунок 4.6). Споживання енергії нижче, ніж у попередніх сценаріях, оскільки мережа передає менше пакетів через часті втрати з'єднання.



Рисунок 4.5 – Коефіцієнт доставки пакетів при критичному сценарії

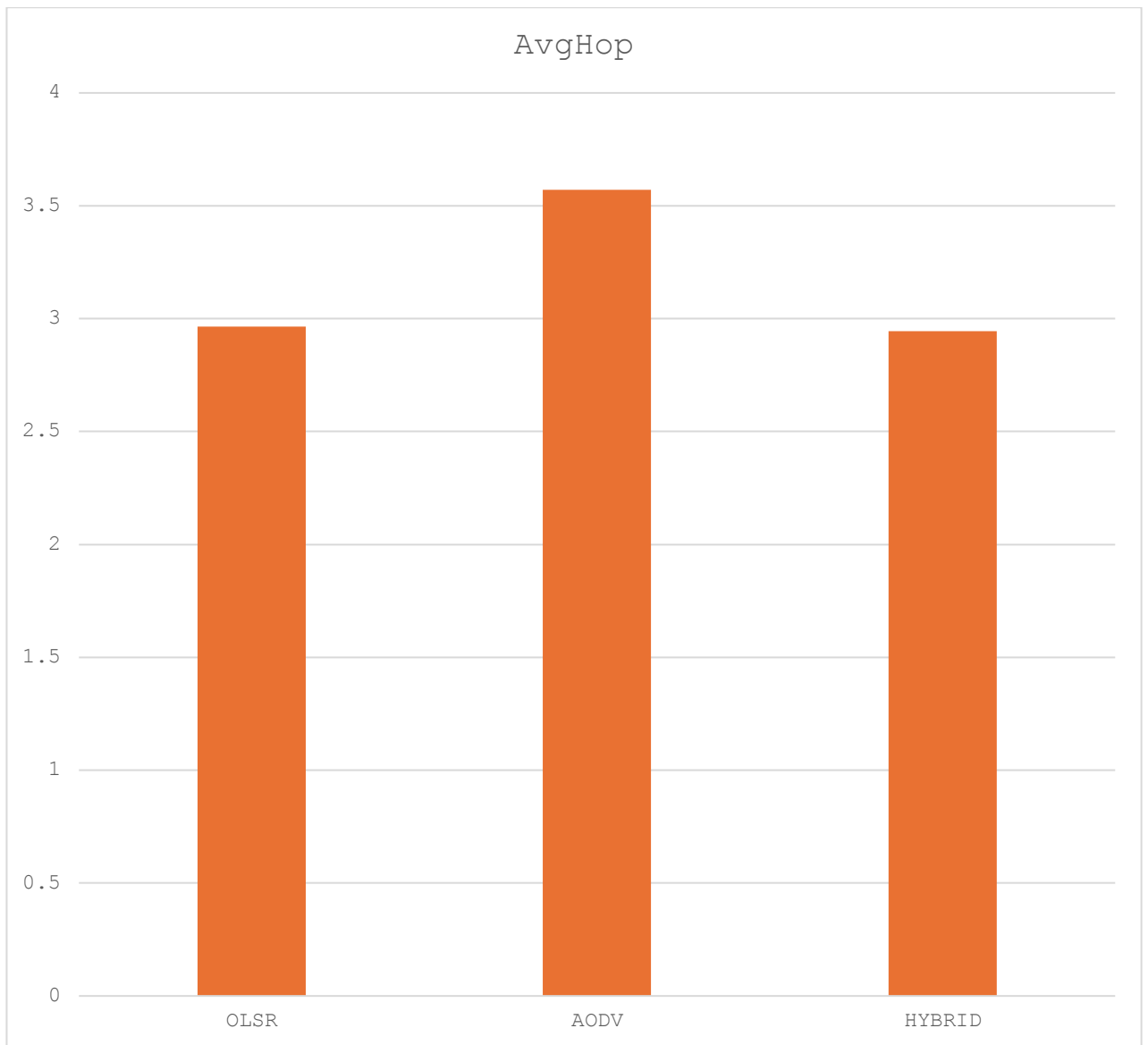


Рисунок 4.6 – Кількість переходів при критичному сценарії

Ці сценарії дозволяють нам побачити, як система працює в багатьох умовах. Система працює в умовах щільного, передбачуваного руху, а також при частих перервах та майже порушеній топології. Перемикач на основі правил між *OLSR* та *AODV* відстежує стабільність графа, рівень заряду батареї вузла та щільність сусідів. Перемикач змінюється, коли змінюється стабільність графа, коли змінюється заряд батареї вузла або коли змінюється щільність сусідів.

У стабільному режимі гібридний підхід працював майже так само, як чистий протокол *OLSR*. Топологія була передбачувана, тому система на основі

правил могла впевнено ідентифікувати, що мережа стабільна. Тому переважно використовувалась проактивна маршрутизація. Проактивна маршрутизація пакетів давала найвищий коефіцієнт доставки серед усіх тестованих. Енергоспоживання в цьому режимі було мінімальним, бо проактивне оновлення таблиці не створювало зайвий трафік. Цей сценарій доводить, що система на основі правил зберігає кращі властивості базового протоколу, коли умови сприятливі.

Швидкість дрони вища, топологія мережі постійно змінюється. У цьому нестабільному сценарії гібридна система показала кращі результати, ніж *OLSR*, і майже такий же, як *AODV*. Гібридна система призводить, що логіка перемикання на реактивний режим працює, коли стабільність низька. Порівняно з гібридною системою *AODV* доставляє пакети трохи краще. Гібридна система забезпечує доставку пакетів під час коротких періодів, коли мережа залишається стабільною і можна використовувати проактивні таблиці. Таким чином, система на основі правил не тільки добре справляється з нестабільністю, але також використовує будь-які короткострокові виправлення топології. Суто реактивний підхід цього зробити не може.

Найгірші результати зафіксовані в режимі деградованої зв'язності. У цьому режимі *FANET* працює близько до межі своєї структури. Більша область симуляції зробила так, що мережа часто була розірвана, частково або повністю. Маршрути зникали швидше, ніж створювалися. Пакети часто не встигали дістатися цілі. У цих умовах заснована на правилах гібридна система показала результати гірші, ніж *AODV*, але значно кращі за *OLSR*. Це демонструє важливу межу підходу на основі правил: система все намагається працювати в проактивному режимі. у моменти, коли локальна стабільність здається достатньою, хоча глобальна структура мережі залишилася нестабільною. Проте навіть за таких умов гібридний метод підтримує роботу мережі та забезпечує доставку частин пакетів, що ілюструє його базову стійкість і здатність адаптуватися навіть у майже розрідженому просторі.

У всіх сценаріях гібридний метод не створює додатковий витрат енергоспоживання. Гібридний метод споживає енергію на рівні двох інших протоколів. Це пояснює алгоритм перемикавання, що впливає лише на логіку вибору маршрутизатора. Алгоритм не змінює модель витрат енергії на передачу та прийом пакетів. Модель витрат енергії однакова для всіх протоколів. Тому механізм на основі правил забезпечує адаптивність без збільшення загальних витрат ресурсів.

Запропонована гібридна підсистема маршрутизації досягла оптимальних показників продуктивності в двох із трьох сценаріїв. У найекстремальнішому режимі підсистема продемонструвала конкурентоспроможність. Це означає, що підхід підходить для реальної *FANET*-системи. Метод, заснований на правилах, сприяє простоті реалізації, передбачуваності поведінки та здатності до динамічної адаптації, що робить його доступною альтернативою для роїв безпілотників.

4.3 Практичні аспекти реалізації *rule-based* маршрутизації в реальних *FANET*

Реалізація *rule-based* гібридної підсистеми маршрутизації, дослідженої в симуляціях, у справжніх систем БПЛА вимагає глибокого розуміння існуючих технічних, фізичних та мережевих обмежень, які складніші, ніж ті, що використовуються в симуляціях. У порівнянні з модельним середовищем, де можна відобразити повний граф зв'язків і точно прогнозувати його трансформацію у проміжках часу, у реальній *FANET* немає можливості визначити мережеву топологію в цілому. Кожен апарат сприймає лише фрагмент мережі, має обмежену зону “огляду” та функціонує під дією затримок, втрат даних, коливань інтенсивності сигналу та похибок у визначенні координат. Отже, реалізація логіки, заснованої на правилах, що обирає між протоколами *OLSR* та *AODV* вимагає коригування показника стабільності та розробки засобів, які

дозволяють визначати стабільність не за даними цілісної топології, а на основі локальних вимірювань

У моделюванні критерій сталості S обчислюється як унормована величина трансформацій у графі зв'язності. У реальній системі ця формула може бути змінена відповідно до місцевих характеристик – замість сукупностей ребер всієї топології беруться комплекти найближчих вузлів конкретного літального апарата. Тому фактична величина $S(t)$ визначається залежно від того, як часто з'являються чи зникають зв'язки між сусідами, з якими певний пристрій був у зоні прийому протягом попередніх інтервалів. Для цього кожен вузол витримує “проміжок” спостереження за локальною взаємопов'язаністю, накопичуючи відомості про коливання в асортименті суміжних елементів, показниках потужності сигналу прийому, числових параметрах індикатора якості лінії або ознаках каналу. Перетворення у цих локальних характеристиках дозволяють розрахувати величину сталості без необхідності загального знання конфігурації усієї системи. У фактичному середовищі цей місцевий критерій може бути навіть більш точним, оскільки він враховує фізичні властивості комунікаційного каналу, які не враховані у моделі.

Також важливим питанням реалізації є визначення модулю у БПЛА, що відповідатиме за обчислення параметру S і прийняття рішення щодо застосування протоколу маршрутизації. У децентралізованій системі *FANET* подібні операції мають бути організовані безпосередньо “на борту”, з уникненням будь яких централізованих контролерів, що в свою чергу суперечило б самим основам *ad-hoc* мереж. Тому *rule-based* модуль та всю його логіку пропонується інтегрувати у мережевий стек кожного дрона як окрема процедура маршрутизації. Це дозволить отримувати дані від нижчих рівнів: апаратного, фізичного. Вони ж і передаватимуть дані про якість каналу, кількість успішних передач, середню затримку. Одночасно маршрутизатор отримує інформацію від протоколів *OLSR* та *AODV*, зокрема частоту оновлення топології, щільність таблиць суміжності та частоту генерації *RREQ*-пакетів. Поєднання цих

показників дозволяє вузлу самостійно визначати, в якому режимі працювати в проактивному або реактивному.

Ключову проблему яку потрібно вирішити під час впровадження підходу є визначення оптимального порогу S . Якщо поріг вибрати надто високим, підсистема часто сприйматиме топологію як нестабільну навіть у відносно передбачуваних, спокійних умовах, що призведе до зайвого використання реактивного протоколу *AODV* і підвищення загальної затримки. Якщо ж поріг буде занадто низьким, система довго залишатиметься у проактивному режимі, незважаючи на часті втрати зв'язності. Визначення порогу неможливо здійснити теоретично без глибоких знань в галузі, конкретних умов завдання та застосування та практичних тестів. Вважається, що значення S встановлюється за результатами натурних експериментів, залежить від динаміки конкретної місії, швидкості БПЛА, частоти зміни висоти, сили вітру та поведінки антен і т.д. Можливо для запропонованої методики є доцільним розширення механізму автокалібрування, яке, теоретично, підлаштує поріг залежно від даних за попередні цикли.

Ще одним важливим аспектом є питання швидкості реагування система на зміни у параметрі S . У реалізованому симуляційному прототипу оновлення здійснювалися на кожному, програмно заданому кроці Δt . У системі реального польоту частота оновлення обмежена швидкістю обробки даних у БПЛА, енергоспоживанням та пропускною здатністю радіоканалу. Занадто часті зміни параметру S , відповідно призведуть до частого перемикання між *OLSR* та *AODV* це потягне за собою коливання маршрутизатора, збільшення службового трафіку та зниження ефективності. Тому у практичній системі *rule-based* блок має включати рішення на кшталт гістерезис або мінімальний інтервал утримання обраного режиму, щоб уникнути ситуації, коли протокол перемикається туди–назад без істотного покращення.

Питання енергоефективності також відіграє важливу роль. У реальних *FANET* енергоспоживання формується не тільки передаванням пакетів, як досліджувалося у симуляції, але й роботою сенсорів, навігаційних систем,

стабілізаційних *PID*-контролерів та обчисленням положення через *GPS*(*Global Positioning System*) або візуальну одометрію і т. д.. Тому прогноз витрат енергії, який у симуляції базується на моделі номер, у реальності має інший масштаб.

Таким чином, практична реалізація *rule-based* гібридної маршрутизації у *FANET* є технічно досяжною та може бути інтегрована у реальні польотні системи дронів за умови правильного визначення локальних метрик стабільності, механізмів синхронізації режимів, адаптивних порогів та обмеження частоти перемикавання.

Висновки до розділу

Результати експериментального моделювання показали, що *rule-based* гібридна маршрутизація функціональну адекватність та концептуальну обґрунтованість сенс для повітряних *ad-hoc* мереж *FANET*. У сценаріях, які протестовано, система змогла пристосуватися до різних способів руху, рівня щільності та надійності топології мережі. Це дало змогу перевірити її ефективність у багатьох різних ситуаціях. В умовах топологічної стабільності, запропонований механізм демонструє повну реалізацію переваг, притаманних протоколам проактивної маршрутизації. Він дає високий відсоток доставки пакетів, невелику кількість перемикань у середньому і мало витрачає енергію. Це демонструє, що механізм вибору протоколу правильно розпізнає моменти з низькою динамікою.

У випадках з великою мобільністю гібридна система дала кращі показники, ніж *OLSR*. Проте, за певними метриками спостерігається незначна деградація порівняно з протоколом *AODV*. Загалом це виглядає як баланс між надійністю маршрутів і їхньою простотою. *Rule-based* логіка тут спрацьовує. Вона дозволяє використовувати короткі моменти стабільності, які реактивні методи не фіксують.

Навіть за умови найбільш екстремальних експлуатаційних сценаріїв, розроблена гібридна підсистема продемонструвала конкурентний рівень

відмовостійкості та забезпечила підтримання функціональної цілісності мережевої структури. Навіть коли граф частково розпадався, вона поступалася *AODV* за *PDR*, але проти *OLSR* результат був кращий. Це показує слабкі місця *rule-based* підходу. Іноді він помилково вмикає проактивний режим у локально спокійних, але загалом нестабільних умовах. Проте навіть тут система забезпечувала основний рівень маршрутизації.

При аналізі витрат енергії, зроблено висновок, що гібридна система не додає зайвого навантаження на батареї дронів. Вона витрачає стільки ж, скільки звичайні протоколи. Адаптивність приходить без шкоди для енергоефективності. Для мобільних безпілотних систем це ключова риса.

Підсумовуючи три сценарії, *rule-based* гібридний метод дає стабільну і передбачувану роботу *FANET* у багатьох умовах. Він поєднує легкість впровадження з ефективністю. Тому його можна брати як реальну альтернативу складнішим і ресурсоємним розумним системам маршрутизації.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи на тему “Інтелектуальна підсистема управління роєм БПЛА” всебічно досліджено питання надійної, гнучкої, енергоефективної маршрутизації в децентралізованих повітряних мережах *FANET*, які нині є головним фактором промислового виробництва, цивільних і оборонних застосувань безпілотних літальних апаратів. Ґрунтуючись на теоретичному аналізі, побудовано власний симуляційний прототип і виконано серію експериментів, що привело до розв’язання науково–прикладної задачі – створення *rule-based* гібридної підсистеми маршрутизації, здатної адаптуватися до мережевої топології і не втрачаючи ефективності основних метрик *FANET*.

Отримано основні результати кваліфікаційної роботи, спрямовані на розв’язання науково-прикладної задачі забезпечення надійної, адаптивної та енергоефективної маршрутизації в децентралізованих повітряних мережах *FANET*.

Досліджено особливості функціонування повітряних *ad-hoc* мереж, зумовлені високою швидкістю руху вузлів, їх тривимірною мобільністю та мінливими радіоканалами. Встановлено, що в таких умовах класичні протоколи маршрутизації не забезпечують стабільних показників доставки пакетів, затримки та енергоспоживання, а наявні гібридні й інтелектуальні підходи як правило, характеризуються високою обчислювальною складністю. Це ускладнює їх ефективне масштабування та подальшу імплементацію в реальні системи БПЛА, що функціонують в умовах суттєво обмежених апаратних ресурсів.

Проаналізовано математичні моделі мобільності, зокрема модель Гаусса–Маркова, яка забезпечує часову кореляцію швидкостей та формує реалістичні траєкторії руху БПЛА. Обґрунтовано, що поєднання цієї моделі з гібридною маршрутизацією дозволяє адекватно відтворювати топологічну динаміку *FANET* та використовувати її як основу для прийняття рішень щодо перемикання маршрутних режимів. Аргументовано вибір *rule-based* підходу як збалансованої

альтернативи ресурсоємним гібридним методам, проактивним і реактивним протоколам.

Створено повноцінний симуляційний прототип гібридної маршрутизації *FANET*, який включає модулі генерації руху, побудови графа зв'язності, реалізації протоколів *OLSR* та *AODV*, *rule-based* механізм перемикання, енергетичну модель та систему збору статистичних показників. Розроблено алгоритм прийняття рішень на основі показників стабільності мережі, що визначає доцільність переходу між проактивним та реактивним режимами маршрутизації.

Проведено експериментальні дослідження у стабільному, нестабільному та деградованому режимах зв'язності, у межах яких оцінено коефіцієнт доставки пакетів, середню кількість переходів та середнє енергоспоживання. Підтверджено, що запропонована *rule-based* гібридна підсистема забезпечує конкурентні або кращі значення *PDR* у всіх сценаріях порівняно з базовими протоколами. У деградованих умовах показано, що система зберігає працездатність навіть за часткової фрагментації мережі.

Запропоновано формальну метрику стабільності топології *FANET*, яка може використовуватися як у *rule-based* системах, так і в інших методах для оцінки динамічності мережі. Підтверджено практичну придатність розробленого підходу для використання в симуляційних дослідженнях та потенційного впровадження у реальні бортові системи керування БПЛА з обмеженими обчислювальними ресурсами.

У контексті наукової новизни робота запропонувала формальну метрику стабільності топології *FANET*, яка може використовуватися не лише в *rule-based* системах, але й у методах машинного навчання як індикатор динамічності мережі. Новизною також є застосування *rule-based* гібридної маршрутизації в поєднанні з точною моделлю мобільності Гаусса–Маркова та енергетичним модулем.

Практична цінність роботи полягає у створенні симуляційного інструменту, придатного до розширення та використання для подальших академічних і промислових досліджень. Запропонована архітектура може

інтегруватися в реальні бортові системи керування БПЛА, оскільки не вимагає великих обчислювальних ресурсів. *Rule-based* механізм може бути інтегрований у мікроконтролери БПЛА без додаткових модулів, що робить його перспективним для побудови малих роїв. Крім того, результати роботи можуть бути використані для покращення маршрутизації під час пошуково-рятувальних операцій, моніторингу територій, забезпечення мережевого ретрансляційного покриття і т. д.

Отримані кількісні показники підтверджують надійність запропонованого підходу. У стабільній топології *PDR* гібридної системи та *OLSR* перевищував 0.86, у нестабільній мережі *rule-based* алгоритм забезпечив найвищий *PDR* на рівні 0.43, а в режимі деградованої зв'язності забезпечував показники, кращі за *OLSR*, і конкурентні з *AODV*. Середня кількість переходів у стабільному режимі була мінімальною, а в нестабільному – не погіршувалася порівняно з *AODV*. Енергоспоживання в усіх сценаріях залишалось ідентичним між протоколами, що свідчить про нейтральність *rule-based* підходу щодо енергетичних витрат.

Підсумовуючи, можна зазначити, що робота досягла поставленої мети – створено, обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність *rule-based* гібридної підсистеми маршрутизації, яка забезпечує адаптивність, стабільність, прозорість і практичну придатність для *FANET*. Усі завдання, визначені у вступі та деталізовані в кожному з розділів, виконані повною мірою.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hasan S. A., Mohammed M. A., Sulaiman S. K. *Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): Review of Communications, Challenges, Applications, Future direction and Open Research Topics*. *ITM Web of Conferences*. 2024. Т. 64. С. 01002. URL: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20246401002> (дата звернення: 11.12.2025).
2. *Towards Autonomous Multi-UAV Wireless Network: A Survey of Reinforcement Learning-Based Approaches* / Y. Bai та ін. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2023. С. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2023.3323344> (дата звернення: 11.12.2025).
3. *StratoTrans: Unmanned Aerial System (UAS) 4G Communication Framework Applied on the Monitoring of Road Traffic and Linear Infrastructure* / R. Guirado та ін. *Drones*. 2021. Т. 5, № 1. С. 10. URL: <https://doi.org/10.3390/drones5010010> (дата звернення: 11.12.2025).
4. *Energy-efficient location-based routing algorithms for three dimensional mobile ad hoc networks*. *Journal of Mathematical and Computational Science*. 2021. URL: <https://doi.org/10.28919/jmcs/5617> (дата звернення: 11.12.2025).
5. *A self-adaptive gradient-based particle swarm optimization algorithm with dynamic population topology* / D. Zhang та ін. *Applied Soft Computing*. 2022. С. 109660. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109660> (дата звернення: 11.12.2025).
6. *Routing protocols strategies for flying Ad-Hoc network (FANET): Review, taxonomy, and open research issues* / M. J. Almansor та ін. *Alexandria Engineering Journal*. 2024. Т. 109. С. 553–577. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.09.032> (дата звернення: 11.12.2025).
7. *Analyzing Impact of Types of UAV-Derived Images on the Object-Based Classification of Land Cover in an Urban Area* / G. Park та ін. *Drones*. 2022. Т. 6, № 3. С. 71. URL: <https://doi.org/10.3390/drones6030071> (дата звернення: 11.12.2025).

8. *A systematic literature review of emergency communications assisted by unnamed aerial vehicles* / I. López–Villegas та ін. *Ad Hoc Networks*. 2026. Т. 182. С. 104063. URL: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2025.104063> (дата звернення: 11.12.2025).
9. *Moraitis N., Psychogios K., Panagopoulos A. D. A Survey of Path Loss Prediction and Channel Models for Unmanned Aerial Systems for System–Level Simulations*. *Sensors*. 2023. Т. 23, № 10. С. 4775. URL: <https://doi.org/10.3390/s23104775> (дата звернення: 11.12.2025).
10. *A Novel UAV Air–to–Air Channel Model Incorporating the Effect of UAV Vibrations and Diffuse Scattering* / W. Qi та ін. *Drones*. 2024. Т. 8, № 5. С. 194. URL: <https://doi.org/10.3390/drones8050194> (дата звернення: 11.12.2025).
11. *3D Mobility Models and Analysis for UAVs* / P. J. Smith та ін. *2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, м. London, United Kingdom, 31 серп. – 3 верес. 2020 р.* 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/pimrc48278.2020.9217263> (дата звернення: 11.12.2025).
12. *Joint Resource Allocation and Trajectory Optimization for Completion Time Minimization for Energy–Constrained UAV Communications* / W. Du та ін. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2022. С. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1109/tvt.2022.3222526> (дата звернення: 11.12.2025).
13. *Towards Autonomous Multi–UAV Wireless Network: A Survey of Reinforcement Learning–Based Approaches* / Y. Bai та ін. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2023. С. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2023.3323344> (дата звернення: 11.12.2025).
14. *Performance Evaluation of Standard and Modified OLSR Protocols for Uncoordinated UAV Ad–Hoc Networks in Search and Rescue Environments* / A. H. Wheeb та ін. *Electronics*. 2023. Т. 12, № 6. С. 1334. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics12061334> (дата звернення: 12.12.2025).

15. Kumar A., Kumar A., Agrawal A. V. *Enhanced AODV routing analysis for mobile Ad Hoc networks*. *Discover Electronics*. 2025. Т. 2, № 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s44291-025-00069-8> (дата звернення: 12.12.2025).
16. Єфименко О. С. Розвиток методів маршрутизації в повітряних *ad-hoc* мережах : Магістерська робота. Київ, 2021. 129 с.
17. *Empowering Adaptive Geolocation-Based Routing for UAV Networks with Reinforcement Learning* / C. Park та ін. *Drones*. 2023. Т. 7, № 6. С. 387. URL: <https://doi.org/10.3390/drones7060387> (дата звернення: 12.12.2025).
18. *A Low-Overhead Routing Protocol for FANET Based on Ant Colony Algorithm* / Z. Wang та ін. *Communications and Networking*. Cham, 2023. С. 321–333. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-34790-0_25 (дата звернення: 12.12.2025).
19. *Energy efficient routing in quantum flying ad hoc network (q-fanet) using mamdani fuzzy inference enhanced dijkstra's algorithm (mfi-eda)* / S. Geetha та ін. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2024. Т. 15, № 102. С. 3708–3724. URL: <https://www.jatit.org/volumes/Vol102No9/1Vol102No9.pdf> (дата звернення: 12.12.2025).
20. *FANET Routing Protocol Analysis for Multi-UAV-Based Reconnaissance Mobility Models* / T. Kim та ін. *Drones*. 2023. Т. 7, № 3. С. 161. URL: <https://doi.org/10.3390/drones7030161> (дата звернення: 12.12.2025).
21. *Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges* / A. Fotouhi та ін. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020. Т. 21, № 4. С. 3417–3442. URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2019.2906228> (дата звернення: 12.12.2025).
22. *Construction of FANETs for user coverage and information transmission in disaster rescue scenarios* / Y. Liu та ін. *Computer Communications*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.05.014> (дата звернення: 12.12.2025).
23. *Energy Efficiency Optimization for UAV-RIS-Assisted Wireless Powered Communication Networks* / X. Shen та ін. *Drones*. 2025. Т. 9, № 5. С. 344. URL: <https://doi.org/10.3390/drones9050344> (дата звернення: 12.12.2025).

24. *Energy model for UAV communications: Experimental validation and model generalization* / N. Gao та ін. *China Communications*. 2021. Т. 18, № 7. С. 253–264. URL: <https://doi.org/10.23919/jcc.2021.07.020> (дата звернення: 12.12.2025).
25. *Interference–Aware Multi–Hop Routing in UAV Networks: A Harmonic Function–Based Potential Field Approach* / H. Liu та ін. *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. С. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2024.3366580> (дата звернення: 12.12.2025).
26. Кашкевич С. О., Шишацький А. В. Аналіз математичних моделей маршрутизації в бездротових мережах спеціального призначення. XXXV *International Scientific and Practical Conference "Modern methods of solving scientific problems of reality"*. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/375768512_Analiz_matematicnih_modelej_marsrutizacii_v_bezdrotovih_merezah_specialnogo_priznacenna (дата звернення: 12.12.2025).
27. *A deep learning approach for wireless network performance classification based on UAV mobility features* / Y. Bai та ін. *Drones*. 2023. Т. 7, № 6. С. 377. URL: <https://doi.org/10.3390/drones7060377> (дата звернення: 12.12.2025).
28. *BOLD: bio–inspired optimized leader election for multiple drones* / R. Ganesan та ін. *Sensors*. 2020. Т. 20, № 11. С. 3134. URL: <https://doi.org/10.3390/s20113134> (дата звернення: 12.12.2025).
29. *Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges* / A. Fotouhi та ін. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Т. 21, № 4. С. 3417–3442. URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2019.2906228> (дата звернення: 12.12.2025).
30. Naser M. T., Wheeb A. H. *Implementation of RWP and Gauss Markov Mobility Model for Multi–UAV Networks in Search and Rescue Environment. International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*. 2022. Т. 16, № 23. С. 125–137. URL: <https://doi.org/10.3991/ijim.v16i23.35559> (дата звернення: 12.12.2025).

31. Asaamong G., Mendes P. *A position-based hybrid routing protocol for clustered flying ad hoc networks. Drones and autonomous vehicles.* 2023. Т. 1, № 1. С. 10001. URL: <https://doi.org/10.35534/dav.2024.10001> (дата звернення: 12.12.2025).
32. Tho M. C., Binh L. H., Vo T. T. *GPSR-CB: A novel routing algorithm for FANET using cross-layer models in combination with multi-level backbone UAV. Ad hoc networks.* 2025. Т. 173. С. 103828. URL: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2025.103828> (дата звернення: 12.12.2025).
33. *DLSA: delay and link stability aware routing protocol for flying ad-hoc networks (fanets)* / A. Hussain та ін. *Wireless personal communications.* 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08839-9> (дата звернення: 12.12.2025).
34. *An intelligent framework for resilience recovery of fanets with spatio-temporal aggregation and multi-head attention mechanism* / Z. Guo та ін. *Computers, materials & continua.* 2024. С. 1–10. URL: <https://doi.org/10.32604/cmcc.2024.048112> (дата звернення: 12.12.2025).
35. Мирошниченко І. Інтегровані навігаційні та комунікаційні протоколи для автономних інтелектуальних систем: архітектури, моделі та виклики реалізації в динамічних середовищах. *Information technology and society.* 2025. № 2 (17). С. 116–122. URL: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.2.17> (дата звернення: 12.12.2025).

Фрагмент файлу конфігурації

```
# Простір моделювання (3D)  
MAP_LENGTH = 1100  
MAP_WIDTH = 1100  
MAP_HEIGHT = 100  
# Час симуляції  
SIM_TIME = 40 * 1e6 # мкс ( $\approx 40$  с)  
# Конфігурація рою  
NUMBER_OF_DRONES = 20  
SPEED_RANGE = [40, 90] # км/год  
MOBILITY_MODEL = "gauss_markov"  
# Радіопараметри  
SENSING_RANGE = 360 # м  
NEIGHBOR_RADIUS = 300 # м  
TRANSMITTING_POWER = 0.25 # Вт  
  
# Енергетична модель  
INITIAL_ENERGY = 300_000  
ENERGY_THRESHOLD = 0.5 * INITIAL_ENERGY  
  
# Параметри гібридної маршрутизації  
HYBRID_MODE = 1  
STABILITY_THRESHOLD = 0.22  
  
# Параметри пакетів  
AVERAGE_PAYLOAD_LENGTH = 1024 * 8 # біт  
PACKET_LIFETIME = 15 * 1e6 # мкс
```

Фрагмент файлу експерименту

```
import simpy
import numpy as np
import pandas as pd

from utils import config
from simulator.simulator import Simulator
from routing.olsr import OLSRRouting
from routing.aodv import AODVRouting
from routing.hybrid import HybridRouting

# Фіксований набір запусків (multi-run)
SEEDS = [1, 2, 3, 4]

# Сценарій нестабільної FANET
config.setup_unstable_fanet()

def run(protocol, seed):
    env = simpy.Environment()
    sim = Simulator(seed, env, n_drones=config.NUMBER_OF_DRONES)

    # Вибір протоколу маршрутизації
    for d in sim.drones:
        if protocol == "OLSR":
            d.routing_override = OLSRRouting(sim, d, config.NEIGHBOR_RADIUS)
        elif protocol == "AODV":
            d.routing_override = AODVRouting(sim, d, config.NEIGHBOR_RADIUS)
        else:
            d.routing_override = HybridRouting(sim, d, config.NEIGHBOR_RADIUS)
```

```

env.run(until=config.SIM_TIME)

m = sim.metrics

pdr = len(m.datapacket_arrived) / max(m.datapacket_generated_num, 1)
avg_hop = np.mean(list(m.hop_cnt_dict.values())) if m.hop_cnt_dict else 0
avg_energy = np.mean([d.residual_energy for d in sim.drones])

return pdr, avg_hop, avg_energy

def multirun(protocol):
    results = [run(protocol, s) for s in SEEDS]
    pdr, hop, energy = zip(*results)

    return {
        "Protocol": protocol,
        "AvgPDR": np.mean(pdr),
        "AvgHop": np.mean(hop),
        "AvgEnergy": np.mean(energy)
    }

if __name__ == "__main__":
    data = [
        multirun("OLSR"),
        multirun("AODV"),
        multirun("HYBRID")
    ]

df = pd.DataFrame(data)
df.to_excel("benchmark_results.xlsx", index=False)

```

Фрагмент файлу реалізації протоколів маршрутизації

```
import numpy as np
from utils import config
from routing.olsr import OLSRRouting
from routing.aodv import AODVRouting
from routing.topology_utils import build_connectivity_graph

class HybridRouting:
    """
    Rule-based гібридний алгоритм маршрутизації FANET.
    Перемикає OLSR / AODV залежно від стабільності топології
    та локального енергетичного стану вузлів.
    """

    def __init__(self, simulator, drone):
        self.sim = simulator
        self.drone = drone
        self.env = simulator.env

        self.olsr = OLSRRouting(simulator, drone)
        self.aodv = AODVRouting(simulator, drone)

        self.prev_edges = None
        self.S_filtered = 1.0

    def _topology_stability(self, G):
        """Оцінка стабільності топології за зміною ребер"""
```

```

edges = set(G.edges())
if self.prev_edges is None:
    self.prev_edges = edges
    return 1.0

diff = edges.symmetric_difference(self.prev_edges)
S = 1.0 - len(diff) / max(len(edges) + len(self.prev_edges), 1)
self.prev_edges = edges

alpha = 0.6
self.S_filtered = alpha * S + (1 - alpha) * self.S_filtered
return self.S_filtered

def _min_local_energy(self, G):
    """Мінімальна енергія серед сусідів"""
    energies = [self.drone.residual_energy]
    for nid in G.neighbors(self.drone.identifier):
        energies.append(self.sim.drones[nid].residual_energy)
    return min(energies)

def next_hop_selection(self, packet):
    G = build_connectivity_graph(self.sim, config.NEIGHBOR_RADIUS)
    S = self._topology_stability(G)
    min_E = self._min_local_energy(G)
    if min_E < config.ENERGY_THRESHOLD or S <
config.STABILITY_THRESHOLD:
        return self.aodv.next_hop_selection(packet)
    else:
        return self.olsr.next_hop_selection(packet)

```