

УДК 004.738.5

ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ У ТРАНСПОРТНІЙ СИСТЕМІ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ VEHICULAR AD HOC NETWORKS



[Л.О. ТОКАР](#), [О.О. МАРТИНЧУК](#), [П.В. СОЛОВЙОВ](#)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Abstract – The current issue of improving the quality of road traffic in VANET transport networks is considered. It is shown that one effective approach to increasing network scalability and connection reliability in VANET networks is the use of clustering algorithms. Clustering improves the network's overall stability and performance by combining transport nodes into clusters under certain conditions, effectively reducing network load. The study of ABCA and MOCA algorithms aims to obtain results that confirm the general goal of clustering: grouping transport units into long-lasting clusters. The study focuses on identifying key performance indicators for the VANET transport network: cluster service life, cluster member lifetime, and the number of clusters. To assess changes in network load, statistical data on the number of clusters and transport nodes at different points in time when the transport flow density changed were collected. The results of the study were evaluated by analyzing specific metrics characterizing the operation of transport nodes in the network. The intensity of service message exchange between network nodes was analyzed to compare and assess the effectiveness of clustering algorithms. It was noted that an increase in the number of transport nodes affects the total traffic volume and the possibility of forming clusters with acceptable parameters. It was shown that the choice of algorithm depends on the project's priorities and network characteristics at any given time in the transport situation. The practical significance of the results lies in the successful formation of stable clusters and the possibility of inter-cluster service message exchanges between transport nodes to maintain communication, thereby contributing to the effective real-time organization of traffic. Recommendations are given for the use of the MOSA and ABCA clustering algorithms in different traffic flow conditions. The MOSA algorithm enables the formation of a stable group of clusters on highways, whereas the ABCA algorithm demonstrates more stable operation in an urban environment.

Анотація – Розглянуто актуальне питання підвищення якості дорожнього руху в транспортних мережах VANET. Показано, що один із ефективних підходів для збільшення масштабованості мережі та надійності з'єднань в мережах VANET – це використання алгоритмів кластеризації. Кластеризація покращує загальну стабільність та продуктивність мережі завдяки об'єднанню транспортних вузлів у кластери за певними умовами, що ефективно знижує навантаження в мережі. Дослідження алгоритмів ABCA і MOCA спрямоване на отримання результатів, що підтверджують загальну мету кластеризації – групування транспортних одиниць у кластери впродовж тривалого часу. В дослідженні основну увагу приділено знаходженню ключових показників продуктивності транспортної мережі VANET: тривалості служби кластера, часу життя членів кластера, кількості кластерів. Для оцінки змін завантаженості в мережі зібрано статистичні дані про кількість кластерів і транспортних вузлів у різні моменти часу при зміні щільності транспортного потоку. Проведено оцінку результатів дослідження шляхом аналізу метрик, які відзначають особливості роботи транспортних вузлів в мережі – інтенсивності обміну службовими повідомленнями між вузлами в мережі для порівняння та оцінки ефективності алгоритмів кластеризації. Відмічено, що збільшення кількості транспортних вузлів впливає на загальний обсяг трафіку та можливості формування кластерів з прийнятними параметрами. Показано, що вибір алгоритму залежить від пріоритетів проєкту та характеристик мережі в будь-який час транспортної обстановки. Практичне значення результатів полягає в успішному формуванні стабільних кластерів і можливості міжкластерних обмінів службовими повідомленнями між транспортними вузлами для підтримки зв'язку, що сприяє ефективній організації трафіку в реальному часі. Надано рекомендації щодо використання алгоритмів кластеризації MOCA та ABCA в різних умовах транспортного потоку. Показано, що алгоритмом MOCA забезпечується можливість формування стабільної групи кластерів на автострадах або магістралях, а алгоритм ABCA демонструє більш стабільну роботу у міському середовищі.

Вступ

Транспортні системи відіграють ключову роль у сучасному світі, забезпечуючи мобільність людей та вантажів. Зростаюча кількість транспортних вузлів призводить до збільшення навантаження на дорожню інфраструктуру, що спричиняє численним проблемам, такі як затори та дорожні пригоди. Одним із перспективних рішень підвищення якості дорожнього руху є використання безпроводової технології Vehicular Ad

Нос Networks (VANET), що дозволяє транспортним вузлам обмінюватися інформацією в реальному часі та забезпечує можливість ефективного управління дорожнім рухом. У період, коли на дорогах збільшується кількість транспортних вузлів з підтримкою підключення до Інтернету, такі мережі стають критично важливими для реалізації концепцій автономного транспорту і загалом для розвитку інфраструктури сучасних міст. Це робить використання технології VANET надзвичайно актуальною, адже вона безпосередньо впливає на безпеку, комфорт і навіть екологічність транспорту.

За допомогою технології VANET забезпечується безперервний зв'язок між транспортними засобами Vehicle-to-Vehicle Communication (V2V) та між транспортними засобами й інфраструктурою Vehicle-to-Infrastructure Communication (V2I). Мережі зв'язку транспортних засобів технології VANET створюються самими транспортними одиницями, які виконують функцію вузлів. Стандартом зв'язку для VANET є стандарт IEEE 802.11p, який базується на протоколах сімейства IEEE 1609 і утворює сукупність стандартів IEEE 802.11p/WAVE.

Мережі VANET є основою для інтелектуальних транспортних систем Intelligent Transportation Systems (ITS), основними питаннями яких є проблеми визначення оптимального маршруту та досягнення масштабованості мережі. В контексті цих питань одним із перспективних рішень є використання кластеризації, яка передбачає розбиття мережі на групи транспортних вузлів (кластерів). Кластеризація транспортних вузлів – це успішна стратегія для збільшення масштабованості мережі та надійності з'єднань. Підходи до кластеризації базуються на параметрах мобільності – швидкості, напрямку та траєкторії руху, прискоренні. Ключовим аспектом кластеризації є оптимізація розміру кластерів. Надто великі кластери спричиняють затримки та перевантаження голови кластеру, а занадто малі – часту перекластеризацію.

Зважаючи на це, дослідження алгоритмів кластеризації для динамічного управління транспортними потоками разом з методами машинного навчання спрямовано на прогнозування траєкторій руху та положення транспортних вузлів й адаптацію стратегій кластеризації в реальному часі, що й визначає актуальність дослідження. Динамічна природа транспортних потоків та високий рівень мобільності транспортних засобів ускладнюють процес кластеризації. Стандартні методи часто не можуть забезпечити ефективне управління у швидкозмінних умовах технології VANET, що вимагає розробки рішень з урахуванням змін швидкостей, напрямків руху та топології мережі.

В роботі проведено дослідження алгоритмів кластеризації: адаптивної базової кластеризації Adaptive Based Clustering Algorithm (ABCA) та Mobility-Based Clustering Algorithm (MOCA). Мета дослідження полягає в виявленні основних переваг кожного алгоритму при формуванні кластерів з подальшим наданням рекомендацій при їх використанні в різних умовах транспортного потоку. Для вирішення завдання дослідження виконано аналіз робіт щодо питань використання та дослідження алгоритмів та методів кластеризації; огляд загального принципу групування транспортних вузлів у кластери; моделювання мережі VANET та симуляцію транспортного потоку з різною щільністю; аналіз отриманих результатів.

I. Аналіз робіт, пов'язаних з темою досліджень

Включення потенційного алгоритму кластеризації спрямоване на підвищення безпеки дорожнього руху та забезпечення надійного варіанта маршрутизації повідомлень. Зв'язок між різними об'єктами у мережі VANET є складним через відкрите комунікаційне середовище та високодинамічну природу VANET. Одним з основних завдань у VANET є забезпечення стабільної та безпечної передачі. Питання безпеки та енергоефективності у VANET є важливими. Вони стосуються захисту від несанкціонованого доступу та атак типу «людина посередині». Енергоефективність підтримується за допомогою відповідних протоколів та адаптивних підходів до передачі даних.

Для оцінки вказаних факторів у роботі проаналізовано низку досліджень, у яких розглянуто різні рішення з використанням алгоритмів та методів кластеризації.

Кластеризація на основі топології мережі враховує географічну близькість вузлів, їхнє положення, кількість з'єднань та інші параметри. Алгоритми географічної кластеризації Geographic Source Routing (GSR) і Content-Based Forwarding (CBF) використовують координати вузлів для ефективною маршрутизації, знижуючи затримки передачі та втрати пакетів у динамічних умовах VANET [1].

Алгоритм Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) враховує щільність вузлів та використовується для формування кластерів на основі концентрації вузлів. Цей підхід ефективний для виявлення природних скупчень, таких як затори чи перехрестя, але з ігноруванням ізольованих вузлів [2].

У публікації [3] обговорюється алгоритм кластеризації для VANET, який використовує рішення Swarm Clustering for Vehicular Ad Hoc Network with a Secure Blockchain-based Key Management scheme (SCVAN-BKM) з безпечним управлінням ключами на основі блокчейну, для створення стабільних кластерів та забезпечення безпечного зв'язку. При цьому ризик появи несанкціонованих вузлів знижується і гарантується безпечне, стабільне сполучення між транспортними вузлами.

Авторами в публікації [4] розглянуто підхід з використанням енергоефективного протоколу ANFC-QGSOR для VANET, який поєднує метод кластеризації Adaptive Neural Fuzzy Clustering (ANFC) та маршрутизацію Quantum Glow Worm Swarm Optimization-based Routing (QGSOR). Проведено дослідження вибору голови кластеру Cluster Head (CH) та побудови кластерів шляхом приєднання сусідніх вузлів до CH. При цьому метод ANFC використовується для розрахунку залишкової енергії, відстані та ступеня вузла з використанням вхідних параметрів, а QGSOR використовується для вибору найкращого набору шляхів для міжкластерного зв'язку. Таке об'єднання методів кластеризації спрямоване на покращення пропускної здатності мережі та забезпечення комплексної безпеки.

В публікації [5] запропоновано рішення для виявлення перевантаження даних у середовищі VANET високої щільності з використанням протоколу Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV), продуктивність якого підвищується за рахунок застосування

стратегії кластеризації з використанням алгоритму k -середніх. Основна мета використання протоколу маршрутизації AODV в мережі VANET полягає у виборі найкращого та безпечного маршруту для доставки даних.

У публікації [6] авторами запропоновано новий протокол маршрутизації на основі кластеризації, що поєднує модифікований алгоритм k -середніх з безперервною мережею Хопфілда та завданням максимальної стійкої множини K-Means algorithm with Continuous Hopfield Network and Maximum Stable Set Problem (KMRP) для VANET. Враховується, що основні вхідні параметри алгоритму k -середніх, такі як кількість кластерів та початкові голови кластерів, будуть вибиратися не випадково, а з використанням задачі максимальної стійкої множини у безперервній мережі Хопфілда. Результати моделювання показали роботу протоколу в умовах руху автомагістралями.

В публікації [7] досліджено метод оптимізованої кластеризації вузлів Remora Optimization Algorithm-based Optimized Node Clustering (ROAONC) на основі алгоритму оптимізації Remora для кластеризації вузлів у мережах VANET, який спрямований на досягнення оптимального процесу вибору СН. Схему ROAONC запропоновано для мінімізації накладних витрат в мережі в сценаріях з непередбачуваною щільністю вузлів. Результати моделювання підтвердили кращу продуктивність з точки зору дальності передачі, щільності вузлів, площі мережі та кількості кластерів порівняно з конкурентними протоколами кластеризації на основі алгоритмів оптимізації.

Схема кластеризації вузлів на основі оптимізації Grey Wolf Optimization-based Node Clustering Scheme (GWONCS) запропонована для оптимізації рішення у напрямку надійного та плавного зв'язку у сценарії VANET [8]. Такий підхід ґрунтується на використанні фактору дальності передачі, напряму, швидкості вузлів та балансування навантаження для формулювання функції придатності, яку враховано у процесі кластеризації вузлів. Експериментальні результати підтвердили, що при порівнянні з підходами кластеризації вузлів на основі алгоритмів Particle Swarm Optimization (PSO) і Ant Colony Optimization (ACO) лише 10% транспортних вузлів визначено як СН.

Цікавим рішенням є самоадаптивна багатоядерна кластеризація VANET для мінімізації кількості кластерів, що запобігає мережним витратам [9]. Алгоритм Self-Adaptive Multi-Kernel Clustering for VANET (SAMNET) використано як основу для процесу кластеризації вузлів на основі обмеженого радіодіапазону при прискоренні, уповільненні та непередбачуваній щільності транспортних вузлів у процесі побудови кластерів. Авторами відзначається переваги лінійних підмоделей визначення генерації даних у процесі зв'язку, встановленої у разі непередбачуваного динамічного перемикання. Процес кластеризації виконаний на етапах ініціалізації кластерів, адаптації кластерів та злиття кластерів. Результати дослідження алгоритму SAMNET підтвердили найкращий середній час життя кластерів та швидкість доставки пакетів незалежно від кількості транспортних вузлів, що існують у мережі.

Алгоритм кластеризації з використанням оптимізації для VANET Clustering Algorithm за допомогою Moth Flame Optimization for VANET (CAMONET) запропоновано в публікації [10] для генерації оптимізованої кількості кластерів, щоб гарантувати надійну передачу даних між транспортними вузлами. Показано, що алгоритм

CAMONET, який є свого роду самоадаптованим алгоритмом кластеризації, отримано з переваг підмоделі, що використовує функцію алгоритму лінійної регресії. Отримано оптимальний процес кластеризації з використанням умов, заснованих на дальності передачі, напрямку та швидкості. Експериментальні дослідження підтвердили кращі результати з точки зору мінімізованої кількості кластерів та загальної продуктивності мережі порівняно зі схемами кластеризації вузлів на основі ACO та PSO.

У публікації [11] запропоновано алгоритм кластеризації з використанням оптимізації колонії мурах для VANET Clustering Algorithm з використанням Ant Colony Optimization for VANET (CACONET), робота якого спрямована на побудову оптимізованої кількості кластерів для забезпечення надійної передачі даних між транспортними вузлами з мінімізованою швидкістю втрати пакетів. Алгоритм розглянуто з урахуванням швидкості вузлів, напрямку та дальності передачі. Крім того, враховано різні динамічні умови побудови мережі, які відносяться до ефективного процесу кластеризації вузлів із запровадженням будь-яких накладних витрат у мережу та непотрібною втратою пакетів.

Схему кластеризації вузлів на основі алгоритму оптимізації Grasshopper Optimization Algorithm-based Node Clustering Scheme (GOANCS) запропоновано в публікації [12] для вибору оптимального СН, який є основним елементом при встановленні мінімізованого числа кластерів. Дослідження з використанням алгоритму GOANCS підтвердили мінімізацію накладних витрат у мережі, навіть у сценаріях із непередбачуваною щільністю вузлів, з урахуванням низки параметрів: дальності передачі, щільності вузлів, площі мережі, числа кластерів для формулювання функції придатності. У дослідженнях, проведених для порівняння алгоритмів кластеризації GOANCS, GWOCS та CACONET, використано різні транспортні вузли та розмір сітки. Виявлено найкращу швидкість доставки пакетів та мінімізацію кількості побудов кластерів у порівнянні зі схемами кластеризації вузлів на основі алгоритму оптимізації Dragonfly.

У роботі [13] запропоновано кластеризацію вузлів з використанням оптимізації Node Clustering using Moth Flame Optimization (NCMFO). Використання такого алгоритму спрямоване на підвищення ступеня стійкості мережі. Враховується можливість надійного механізму маршрутизації, що досягається у процесі кластеризації. Визначено, що метод NCMFO є кращим для великих автомагістралей для підвищення якості зв'язку та надійності доставки пакетів для кожного транспортного вузла в мережі. Результати моделювання схеми NCMFO підтвердили скорочення кількості кластерів з мінімізацією накладних мережних витрат незалежно від розміру мережі і дальності передачі.

Питання автентифікації також відіграють важливу роль у забезпеченні безпечного зв'язку для користувачів. Вузли, що надсилають повідомлення, і приймаючий вузол повинні бути довіреними вузлами для забезпечення безпечного зв'язку. Для обміну повідомленнями в мережах VANET авторами в роботі [14] запропоновано протокол безпеки на основі довіри Trust-Based Security Protocol, названий TSME. Досліджено алгоритм утворювання VANET Grouping Algorithm (VGA) як метод кластеризації, який ділить мережу на групи з обраними розділами груп, щоб забезпечити стабільність зв'язку через динамічну природу та високу швидкість мереж VANET.

Поєднання географічної та мобільної кластеризації, як у Mobility and Location Aware Clustering (MLAC), дозволяє враховувати фізичне розташування та динаміку вузлів. Це створює адаптивні мережні структури, захищені криптографічними методами та механізмами виявлення аномалій для захисту від атак [15].

II. Загальне формулювання проблеми

Більшість додатків у VANET потребують оперативної та актуальної відповіді від прилеглих транспортних вузлів. Оскільки VANET має відмінні характеристики, такі як: динамічна топологія, часті відключення мережі, обмежена мобільність та обмежена здатність, то спостерігаються складнощі з поширенням великих пакетів даних в мережі, наприклад, мультимедійного контенту [9]. Крім того, як основні проблеми в такій мережі слід вказати проблеми управління мобільністю, проблеми широкомовного шторму, проблеми відключення мережі, вибору покриття мережі та методів розповсюдження даних [11].

Загальний принцип використання кластеризації спрямований на зменшення перевантаження трафіку та покращення управління мережею, поділеної на менші сегменти – кластери. У кожному кластері призначається центральний вузол – голова кластеру СН, який координує передачу даних та управління мережею. Вибір СН критично залежить від метрик стабільності, мобільності та енергоефективності [18]. Транспортні вузли громадського транспорту вважаються стабільними кандидатами на роль СН через передбачуваність руху [1]. Процес маршрутизації в кластеризованих мережах оптимізується через СН: дані передаються спочатку до СН, а потім між СН різних кластерів, що знижує затримки та кількість «стрибків».

Кожний транспортний вузол в мережі періодично передає повідомлення про своє місцезнаходження сусіднім вузлам. Ці повідомлення, зокрема, включають поточні координати, ідентифікатор вузла, пріоритетний параметр (який використовується для визначення голови кластера), а також інформацію про наявність сусідніх кластерів чи членів кластеру, на основі яких оновлюється список всіх транспортних вузлів [16].

Процес кластеризації стартує з визначення вузла, який має найвищий пріоритет серед найближчих. Цей вузол й стає головою кластера. Голова кластера відповідає за координацію учасників, а також за зв'язок з іншими кластерами. Учасники кластера (інші вузли в межах радіусу дії голови кластера) надсилають голові кластера оновлення про своє місцезнаходження, статус та стан зв'язку. Ці дані дозволяють голові кластера аналізувати стан кластера та приймати рішення про його розширення або реорганізацію. Принцип формування структури кластерів наступний. Загалом кластер – це концептуальна структура, де група вузлів утворює підмережі на дорозі. Вузли в кластері класифікуються на три різні типи: голова кластера СН, члени кластера Cluster Member (CM) та шлюзові вузли Cluster Gateway (GN). Члени кластера, CM, – це звичайні вузли, що належать до кластера. CM можуть брати участь у маршрутизації за запитом СН. Усі CM знаходяться в межах одно- або багатострибкового діапазону

зв'язку СН, таким чином потенційний розмір кластера збільшується з дальністю передачі. Шлюзові вузли, GN, – це CM, обрані СН для управління зв'язком із сусідніми кластерами. GN належить до кількох кластерів, діючи як міст між кластерами. На рис. 1 наведено принцип формування структури кластерів.

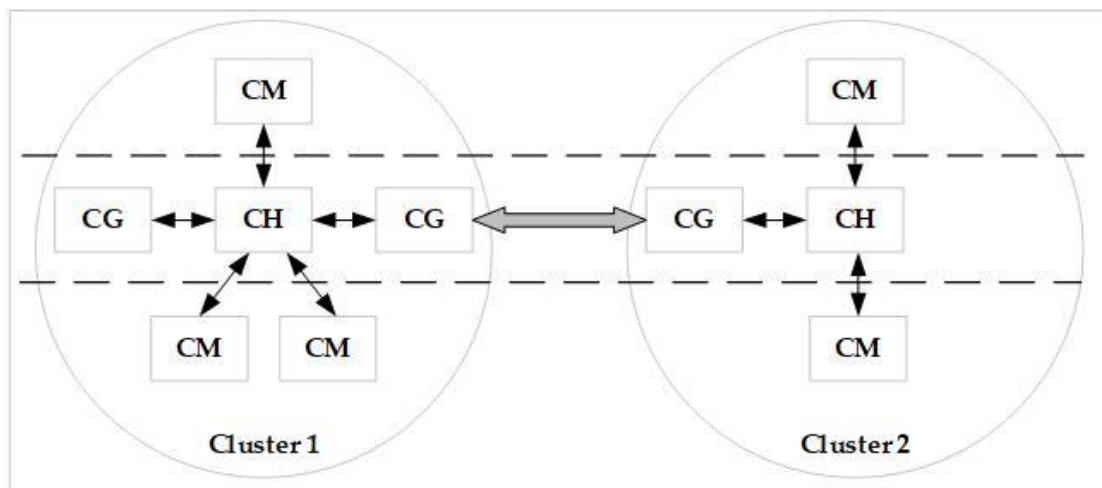


Рис. 1. Принцип формування структури кластерів

Якщо вузол не має змоги ефективно підтримувати зв'язок із головою кластера через збільшення відстані чи зміну мережного стану, він автоматично виходить із кластера. У таких випадках він повторно активує алгоритм пошуку, який може включати перевірку сусідніх кластерів або ініціювання процесу створення нового кластера. Голова кластера, у свою чергу, періодично перевіряє наявність членів і сусідніх кластерів, щоб підтримувати актуальність структури мережі [17].

Через мобільність VANET алгоритми кластеризації, які раніше застосовувалися в Mobile Ad hoc Network (MANET), не можна використовувати. Через тривалість часу, який необхідний для завершення фаз кластеризації, можуть знадобитися додаткові накладні витрати на управління мережею. Для динамічної підтримки структури кластера без суттєвого збільшення мережних витрат ефективна методика кластеризації повинна створювати лише невелику кількість кластерів.

Багато існуючих алгоритмів кластеризації для формування кластерів використовують лише певні умови транспортної обстановки, які не відповідають можливості ефективного управління дорожнім рухом. Зважаючи на це, виникає необхідність в додаткових дослідженнях, де обраний алгоритм кластеризації потребує поєднання з іншими алгоритмами або протоколами. Однак, такий підхід буде відрізнятися більшою складністю реалізації. Тому використання самостійного алгоритму кластеризації для дослідження виявляється більш цікавим підходом.

В даній роботі для дослідження використано два самостійних алгоритми кластеризації: ABCA та МОСА. Дослідження спрямоване на виявлення основних переваг кожного алгоритму при формуванні кластерів з подальшим наданням рекомендацій при їхньому використанні в різних умовах транспортного потоку.

Алгоритм АВСА базується на динамічному об'єднанні транспортних вузлів у кластери, використовуючи їхнє поточне положення, обмін повідомленнями та аналіз найближчого оточення в реальному часі. Алгоритм вважається універсальним завдяки можливості підлаштовуватись до змін щільності й швидкості вузлів, що робить його перспективним для багатofункціональних застосувань [15]. У свою чергу, алгоритм МОСА забезпечує стабільність кластерів завдяки врахуванню ключових параметрів мобільності, таких як швидкість і траєкторія вузлів, що є особливо важливим у сценаріях з високою динамікою [18].

Основна ідея вказаних алгоритмів полягає в об'єднанні транспортних вузлів у малі кластери, що дає змогу зменшити кількість повторних передач даних й підвищити надійність доставки, незважаючи на змінну топологію та швидкий рух транспортних вузлів. Формування кластера залежить від встановлених меж радіусу зв'язку, а також максимального розміру кластера, що зазвичай становить близько 15 вузлів. Якщо кількість вузлів у кластері перевищує цю межу, то вузол, який опинився за її межами, розпочинає процес створення нового кластера або пошуку іншого, доступного для приєднання.

III. Результати дослідження алгоритмів кластеризації

Встановлення початкових даних для моделювання

Для моделювання мережі VANET використано комбінований підхід щодо вибору симуляційних інструментів, який включає симулятор мережних протоколів й засіб для генерування транспортних сценаріїв. Такий вибір обумовлено рядом факторів, таких як рівень деталізації моделювання, підтримка специфічних протоколів, можливість інтеграції з іншими інструментами для генерації транспортних сценаріїв, доступність та зручність використання платформи. Для роботи обрано пакет інструментів Vehicular Environment In Network Simulation (VEINS). VEINS – це симуляційне середовище, яке поєднує два потужні компоненти: Objective Modular Network Testbed in C++ (OMNeT++) – симулятор мереж, що моделює передачу даних, протоколи та фізичний рівень зв'язку, та Simulation of Urban Mobility (SUMO) – симулятор дорожнього руху, що моделює поведінку автомобілів на дорогах.

VEINS пов'язує ці два компоненти через інтерфейс Traffic Control Interface (TraCI), дозволяючи моделювати, як рух автомобілів впливає на якість зв'язку і навіпаки. Інструмент VEINS є відкритим продуктом, інтегрованим з SUMO, що відтворює реалістичне моделювання транспортних сценаріїв при підтримці стандарту IEEE 802.11p. Інтеграція з OMNeT++ забезпечує візуалізацію та аналіз результатів.

В роботі розроблено коди для симуляції з використанням мови програмування Python. Першим етапом дослідження є підготовка середовища симуляції за допомогою SUMO. Створено дорожню мережу з використанням скрипту `osmWebWizard.py`, що інтегрований у SUMO і надає зручний спосіб роботи з реальними географічними даними. Запуск скрипту відкриває вікно браузеру із веб-інтерфейсом, який дозволяє

вибрати регіон для моделювання, та додатковий розділ, що дозволяє побудувати тільки необхідні шляхи для симуляції руху.

У роботі для демонстрації побудови симуляції обрано невеликий регіон, що дозволяє чітко відобразити процеси моделювання в межах обмеженого простору. Визначено чотири основні типи транспортних вузлів: cars (легкові автомобілі), trucks (вантажні автомобілі), bus (автобуси) та motorcycles (мотоцикли). Для коректного відображення реальної транспортної системи, що дозволяє провести достовірне моделювання динаміки руху транспортних вузлів у зазначеному регіоні, виконано конвертацію мапи з відображенням дорожньої мережі з включенням основних магістралей, розв'язок доріг та допоміжних елементів інфраструктури.

Після запуску симуляції в SUMO відображаються транспортні вузли. Згенеровано файли, які доповнено специфічними параметрами для сценаріїв VANET або ITS зі створенням основи для комплексних симуляційних експериментів. За допомогою скрипта osmWebWizard.py імпортовано карту для дослідження.

Для урахування завад, які існують в реальних умовах, в інструменті OMNeT+ задано рівень завад, які створюють різні об'єкти в симуляції. Табл. 1 містить втрати на проходження та втрати для кожної категорії об'єктів.

Таблиця 1. Параметри завад для кожного об'єкту

Категорія об'єктів	Втрати на проходження, дБ/розтин	Втрати на метр, дБ/м
Будівлі	8–10	0,3–0,5
Історичні споруди	8	0,3
Природні об'єкти	5–6	0,2
Штучні споруди	8–10	0,3–0,5

Після налаштування впливу навколишнього середовища в симуляції наступним кроком є конфігурація параметрів антени, яка використовується транспортними вузлами для передачі та прийому сигналів. У табл. 2 наведено основну конфігурацію антени, яка використовується в симуляції. Основні конфігурації взято на основі досліджень стандарту IEEE 802.11p [19].

Таблиця 2. Конфігурація антени в транспортних вузлах

Параметр	Значення
Тип антени	Monopole
Розташування	На даху транспортних вузлів
Висота антени, м	1,895
Частота, ГГц	5,89
Максимальна відстань взаємодії, м	700
Потужність передавача, мВт	20
Мінімальний рівень сигналу, дБм	-110
Пороговий рівень шуму, дБм	-98
Бітрейт, Мбіт/с	6

Для дослідження обрано параметри щільності транспортного потоку (табл. 3).

Таблиця 3. Параметри симуляцій

№ симуляції	Щільність (p)	Час симуляції, с
1	p=0,75	3600
2	p=1	3600
3	p=1,5	1200

Стандарт IEEE 802.11p не налаштовується за замовчуванням у VEINS, але його підтримка забезпечується як частина бібліотеки INET Framework, яка інтегрована з VEINS. Ця бібліотека надає всі необхідні модулі для реалізації стандарту IEEE 802.11p, що є основою для обміну даними V2V та V2I. У VEINS використано спеціальний модуль MAC1609_4, розроблений для підтримки стандарту IEEE 802.11p. Цей модуль відповідає за управління доступом до каналу передачі, роботу сервісних й управлінських каналів, а також за забезпечення коректної роботи мережі в умовах високої щільності вузлів. Щоб забезпечити коректне функціонування стандарту IEEE 802.11p, необхідно правильно налаштувати Network Interface Card (NIC) у конфігураційному файлі omnetpp.ini.

Дослідження алгоритму адаптивної базової кластеризації АВСА

АВСА є підходом до динамічного об'єднання рухомих вузлів у ієрархічні групи з метою впорядкування мережної взаємодії. Кластери формуються за рахунок самовисування певних вузлів у ролі, навколо яких групуються інші вузли (члени кластера). Такий підхід мінімізує взаємодію між усіма вузлами та допомагає оптимізувати розподіл інформаційних повідомлень, зменшувати дублювання трафіку й підвищувати стабільність зв'язку.

В симуляції для транспортних вузлів передбачено чотири стани: undecided; cluster head; cluster member; gateway. Таким чином, обрано наступні змінні для опису необхідного кластеру, які задають основну модель поведінки кожного вузла: role; clusterId; clusterHeadId; priorityValue; maxClusterSize і minClusterSizeForMerge. Змінні для кластеризації повинні задати загальні риси та критерії кластеру, включаючи стани індивідуального транспортного вузла.

Процес кластеризації поділяється на кілька основних етапів: ініціалізація, вибір головного кластера, анонсування ролі, оновлення інформації та підтримка структури кластерів.

На етапі ініціалізації вузли визначають свій стан та параметри. Усі вузли спочатку знаходяться у стані Undecided і мають початкові значення для кластерних параметрів: clusterId = -1, clusterHeadId = -1, hopCount = 0. Таймери, такі як discoveryTimer, roleTransitionTimer та інші, налаштовуються для запуску процесів у відповідний момент. Приклад псевдокоду ініціалізації наведено на рис. 2.

```
for each vehicle in INIT state do
    role = Undecided
    clusterId = -1
    clusterHeadId = -1
    hopCount = 0
    schedule(discoveryTimer, DISCOVERY_INTERVAL)
end for
```

Рис. 2. Алгоритм ініціалізації вузла

Вибір головного кластера здійснюється на основі пріоритетності. Кожен вузол оцінює свій пріоритет за щільністю сусідніх кластерів та за часом існування у мережі. Вузол, який має найвищий пріоритет серед сусідніх вузлів, оголошує себе головним кластером за допомогою повідомлення ClusterHeadAnnouncement. Інші вузли, отримуючи це повідомлення, оцінюють хопи до головного кластера і, якщо умови задоволені, потім приєднуються до відповідного кластеру. Повідомлення ClusterHeadAnnouncement містить ідентифікатор кластера, пріоритетність, кількість хопів і поточний розмір кластера. Далі йде процес формування кластерів. Для того щоб кластер сформувався, використовується алгоритм, що описано на рис. 3.

```
on discoveryTimer event:
    if (role == Undecided) then
        if no higherPriorityCH found in neighborhood then
            becomeClusterHead()
        else
            joinOrRemainUndecided()
    else if (role == ClusterHead) then
        if clusterIsNotFull() then
            acceptJoinRequests()
        else
            suggestOtherNodesToSelfCluster()
```

Рис. 3. Алгоритм формування кластера

Головні кластери періодично відправляють повідомлення ClusterMemberUpdate, яке містить інформацію про поточних членів кластера, кількість хопів і ідентифікатори сусідніх кластерів. Це дозволяє зберігати актуальну інформацію про топологію та уникати конфліктів. Для адаптації до динамічних змін вузли використовують таймаут, об'єднання кластерів та зміну ролей. Якщо кластер стає занадто малим, його вузли можуть приєднатися до сусідніх кластерів, якщо їхній розмір задовольняє умовам.

У вузлів з низькою пріоритетністю або недостатньою кількістю ресурсів роль може змінюватися на ClusterMember або Gateway.

Використання хопів дозволяє зменшити затримки у передачі повідомлень, а адаптивні таймери забезпечують гнучкість у змінних умовах. Під час запуску симуляції, у міру перебігу часу транспортні вузли створюються, зникають та рухаються відповідно до визначених дорожніх сценаріїв. На перших етапах симуляції ініціалізуються стартові транспортні вузли, які починають виконувати базову логіку кластеризації. Процес об'єднання двох членів у кластер зображено на рис. 4.

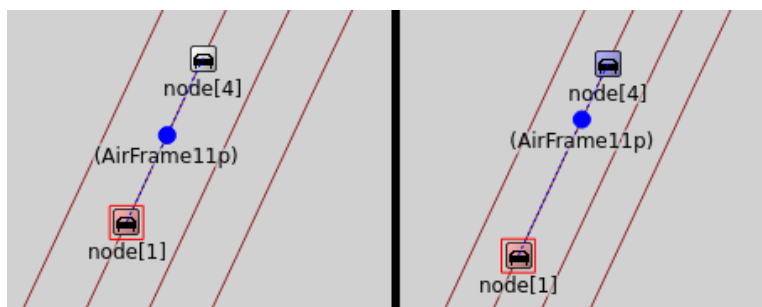


Рис. 4. Об'єднання двох членів в кластер

Якщо один із транспортних вузлів не має визначеної ролі, то в цьому випадку він приєднується до найближчого існуючого кластеру після обміну повідомленнями. На рис. 5 відображено зміну ролей членів кластеру: один із транспортних вузлів, який спочатку був звичайним членом кластеру, може змінити свою роль на шлюз кластеру.

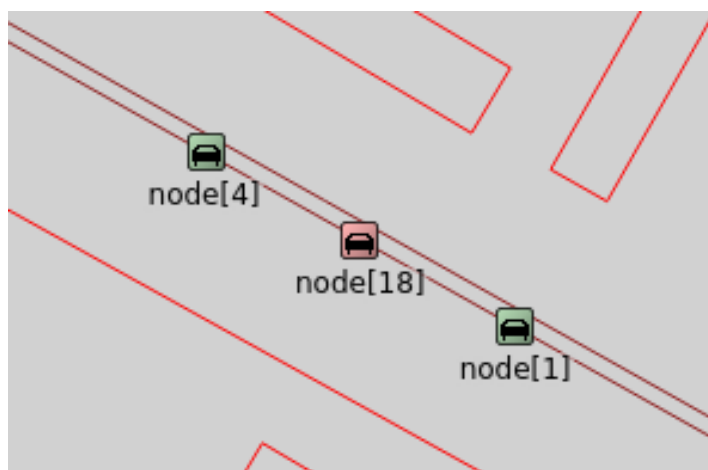


Рис. 5. Зміна ролі з члену кластеру на шлюз кластеру

Шлюз кластеру відіграє роль підтримки стабільного зв'язку між кластером і сусідніми кластерами або транспортними вузлами. Шлюзами стають члени кластеру, які розташовані на найбільшій відстані від головного кластеру. Ця відстань визначається за кількістю хопів між головним кластером та кандидатом у шлюзи. Головний

кластер виконує розрахунок максимально віддалених членів кластеру, отримуючи інформацію про всіх учасників. Після цього він надсилає повідомлення до транспортних вузлів, які повинні прийняти роль шлюзу. Цей процес дозволяє ефективно організувати мережу зі зменшенням загального навантаження.

Протягом симуляції проведено збір даних з інформацією про кількість існуючих кластерів та транспортних вузлів у кожний момент часу. Ці дані є важливими для аналізу динаміки формування кластерів у мережі, оцінки стабільності кластеризації та ефективності підтримки кластерів у реальному часі. Крім того, інформація про кількість транспортних вузлів у різні моменти симуляції дозволяє оцінювати, як змінюється завантаженість мережі в часі, і як ці зміни впливають на роботу алгоритмів кластеризації.

Розроблено код реалізації логіки для збору статистики. Систему збору статистичних даних побудовано на основі розробленої логіки, що в роботі реалізовано в середовищі OMNeT++. Враховано обробку подій у реальному часі, що дозволяє не лише фіксувати стан мережі у визначені моменти, але й динамічно реагувати на зміну умов: збільшення або зменшення кількості транспортних вузлів, переформування кластерів чи зміну параметрів трафіку.

У роботі проведено ряд симуляцій при різних параметрах щільності транспортного потоку, які позначено, як $p_{0,75}$ (щільність $p=0,75$), p_1 (щільність $p=1$), $p_{1,5}$ (щільність $p=1,5$). Отримано результати симуляції, які відображають два ключові параметри, що аналізуються протягом усього часу симуляції. Синім кольором позначено загальну кількість транспортних вузлів, які перебувають у симуляції в кожний момент часу. Ця метрика дозволяє оцінити динаміку появи та зникнення транспортних вузлів у процесі симуляції. Червоним кольором відображено кількість кластерів, які формувалися в процесі роботи алгоритму адаптивної базової кластеризації, що дає змогу оцінити ефективність об'єднання транспортних вузлів у групи (рис. 6–8).

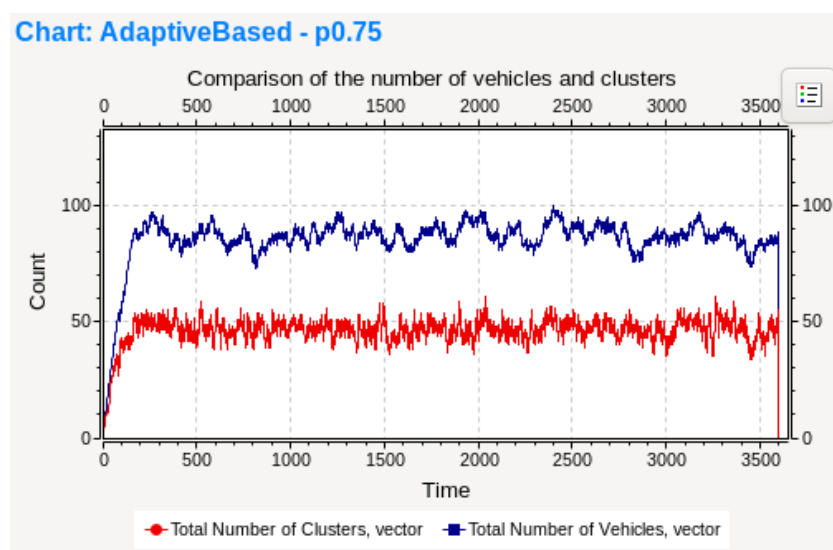


Рис. 6. Результат симуляції АВСА зі щільністю $p_{0,75}$

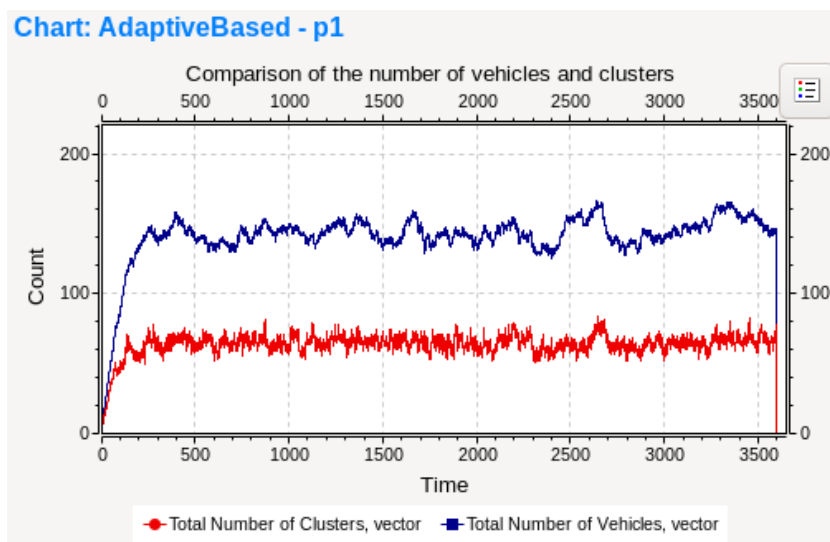


Рис. 7. Результат симуляції АВСА зі щільністю p1

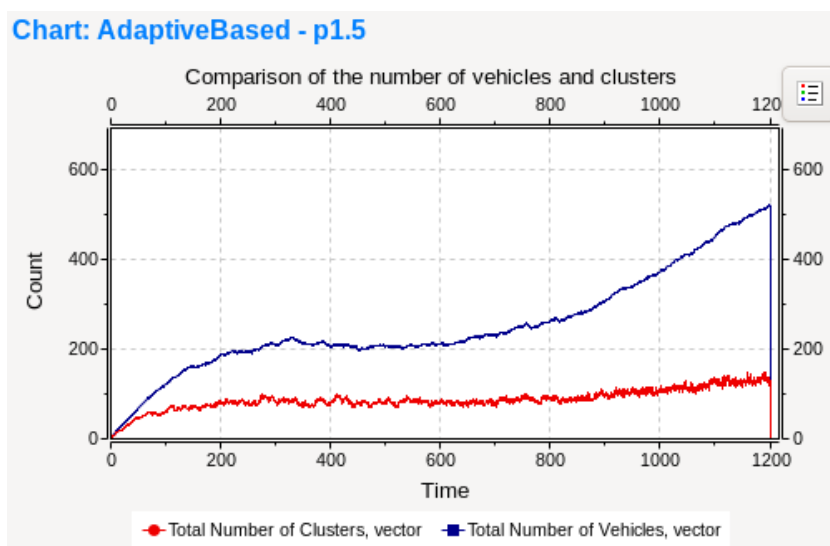


Рис. 8. Результат симуляції АВСА зі щільністю p1,5

Отримані результати показали характерну поведінку системи на фінальних етапах симуляції, коли обидві лінії різко обриваються вниз. Це пов'язано з тим, що як тільки симуляція завершилася, всі об'єкти, які брали участь у процесі (включно з транспортними вузлами, що рухаються мережею, та сформованими кластерами), автоматично припиняють своє існування у віртуальному середовищі. Така різка зміна на графіку свідчить виключно про технічне завершення симуляції: система припиняє зберігати будь-які відомості й повертається в початковий стан перед наступним експериментом. Але ж обрив ліній не є реальною характеристикою поведінки транспортного вузла чи особливістю самого алгоритму кластеризації. У реальному середовищі або тривалішій симуляції, мережа продовжувала б свою діяльність, а транспортні вузли продовжували б утворювати та розформовувати кластери до фактичного зникнення потреби в комунікації чи перебування за межами зони передачі.

Отримані результати свідчать про успішне застосування механізму кластеризації, який допомагає краще розподілити навантаження в мережі, а також знижує кількість обмінних повідомлень і запитів, необхідних для підтримки зв'язку між транспортними вузлами. За результатами досліджень визначено коефіцієнт ефективності кластеризації, який становить 2:1, а при збільшенні кількості транспортних вузлів – 5:1. Це означає, що завдяки грамотній організації й застосуванню кластеризаційного алгоритму вдалося більш, ніж удвічі, скоротити число візуально зареєстрованих вузлів, які брали участь у мережній взаємодії. Іншими словами, транспортні вузли, які спочатку вважалися індивідуальними елементами системи, фактично функціонували як єдиний згрупований вузол, що значно спростило загальне управління мережею та підвищило швидкість обміну даними між учасниками руху.

Таким чином, результативність роботи ABCA залежить як від загальної кількості транспортних вузлів, так і від їхньої просторової близькості. Навіть якщо транспортних вузлів відносно мало і вони рухаються на невеликих відстанях один від одного, то алгоритм спрацьовує і дозволяє досягнути помітного згруповування. З погляду практичного застосування, це відкриває можливості для ефективної організації трафіку у режимі реального часу, коли група близько розташованих транспортних вузлів сприймається мережею як один логічний вузол, а самі транспортні вузли можуть обмінюватися інформацією про дорожню ситуацію або координувати дії під час руху з меншою затримкою та меншим сумарним навантаженням на канал зв'язку.

Дослідження Mobility-Based Clustering Algorithm

Для симуляції МОСА збережено всі конфігурації, включаючи кількість та рух транспортних вузлів. На відміну від ABCA, МОСА враховує не тільки відстань до сусідніх транспортних вузлів, а ще й напрям руху.

VEINS містить в собі клас Coord, який визначає положення транспортних вузлів в симуляції. Отримання позиції відбувається шляхом отримання точок координат x, y, z , які зберігаються в об'єкті.

Алгоритм починається з того, що кожен транспортний вузол у стані PS (початковий стан) періодично надсилає службові пакети HELLO_PACKET (або Beacon). У цих пакетах міститься основна інформація про швидкість транспортного вузла, його позицію та інші актуальні дані (VInfo). Далі відбувається зчитування середньої відносної швидкості та обчислення, чи є інші транспортні вузли в межах максимально допустимих хопів. В кінці циклу оновлюється власна інформація Vinfo для врахування змін, які відбулися в сусідньому середовищі. Значення середньої відносної швидкості AVEREL_SPEED порівнюється з RELATIVE_VELOCITY – показником швидкості, який допомагає з'ясувати найстабільніший кандидат у лідери. Це відбувається, коли транспортний вузол виконує умову TRY_CONNECT і показники швидкості та положення підходять, таким чином встановлюється свій статус – LEADER. В іншому випадку транспортний вузол залишається учасником кластера MEMBER чи продовжує надсилати

HELLO_PACKET, оновлюючи свою інформацію в VInfo. Код цієї логіки відображено на рис. 9.

```
for all the Vehicle == PS do
  Send HELLO_PACKET ∈ VInfo;
  Extract AVEREL_SPEED, ;
  if (AVEREL_SPEED, ) RELATIVE_VELOCITY then
    if TRY_CONNECT == True then
      Set Status LEADER;
    else if
      Set Status MEMBER;
    else
      Unicast HELLO_PACKET;
      Update VInfo;
```

Рис. 9. Алгоритм вибору СН

Далі відбувається зміна статусу транспортного вузла у межах кластера. При максимально можливій кількості учасників у поточному оточенні кластеру транспортний вузол надсилає запит JOIN_REQ_FORWARD і проголошує себе тимчасовим лідером SELF_CH.

Завершальний етап алгоритму показує, як декілька лідерів СН можуть об'єднати свої кластери, коли вони виявлять одне одного в спільній зоні. Якщо лідер СН_i «бачить» ще одного лідера СН_j, то відбувається обмін службовими пакетами, і запускається таймер COMBINE_TIMER для порівняння їх середніх швидкостей AVEREL_SPEED, а також кількості учасників. Той лідер, у якого відмічається вища швидкість, надсилає запит COMBINE_REQ лідеру з нижчою швидкістю, і лідером у новому об'єднаному кластері стає «повільніший» СН, а «швидший» СН фактично передає управління.

Алгоритм МОСА спирається на періодичний обмін службовими повідомленнями, на аналіз швидкостей й можливостей приєднання. Транспортні вузли переходять із початкового стану PS в більш конкретні стани, формують ієрархію кластерів із лідерами та звичайними учасниками, а за потреби об'єднують кластери, якщо це не перевищує ліміти кількості транспортних вузлів й покращує стабільність. Завдяки механізму SELF_CH транспортні вузли не залишаються «в ізоляції»: коли не має можливості приєднатися до готового кластера, транспортний вузол оголошує себе тимчасовим лідером, і до нього згодом теж можуть підключатися інші транспортні вузли. Наявність таймерів й перевірки кількості учасників дає змогу динамічно перепризначати лідерів й запобігає невиправданому розростанню кластерів. Ці процеси спрямовано на зниження кількості надлишкових обмінів повідомленнями, підвищення стабільності маршрутів та забезпечення ефективної передачі мультимедійних даних у гібридній мережі.

Отримані результати симуляції відображені на рис. 10–12.

Chart: MobilityBased - p0.75

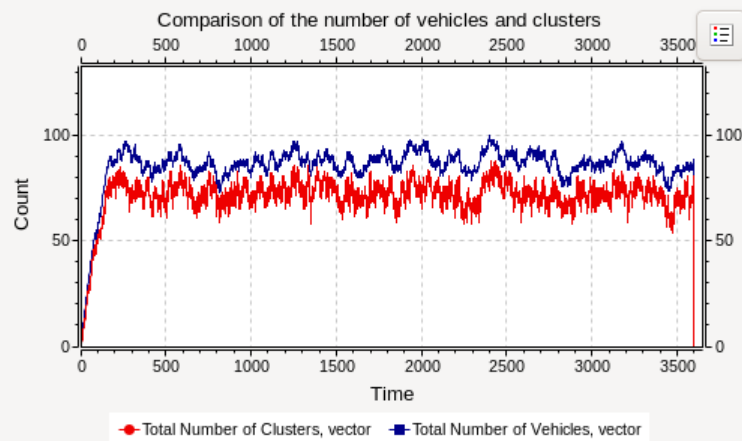


Рис. 10. Результат симуляції МОСА зі щільністю $p_{0,75}$

Chart: MobilityBased - p1

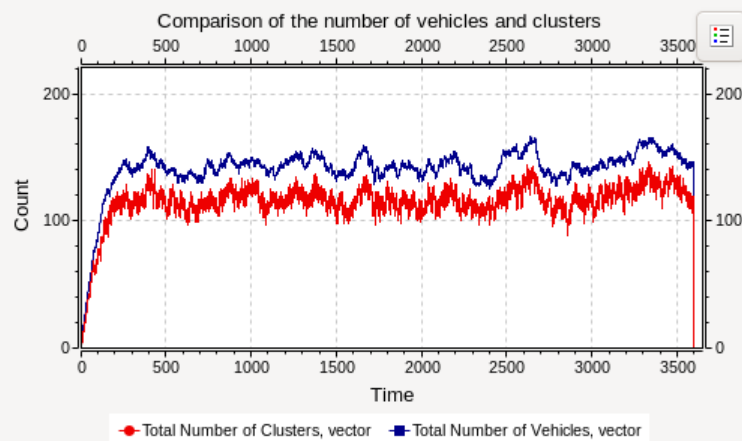


Рис. 11. Результат симуляції МОСА зі щільністю p_1

Chart: MobilityBased - p1.5

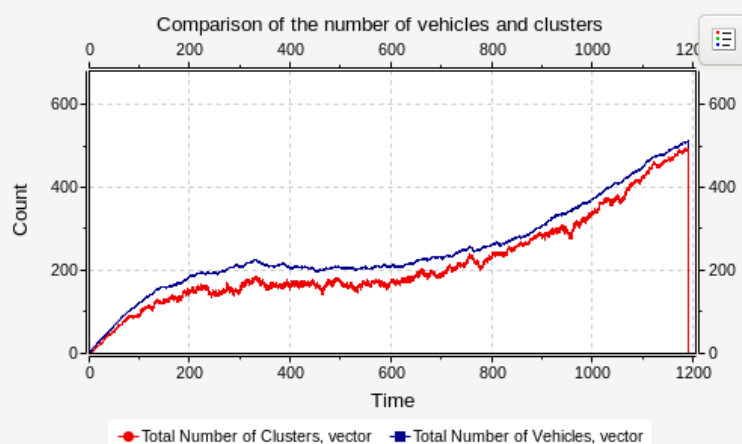


Рис. 12. Результат симуляції МОСА з щільністю $p_{1,5}$

Результати, отримані під час симуляції, виявилися доволі контрастними порівняно з результатами АВСА. Головною причиною такої відмінності є принципова різниця в методі побудови кластерів: за алгоритмом МОСА на відміну від АВСА додатково проводиться аналіз та враховується напрям руху кожного транспортного вузла. Це означає, що кластер формується лише за умови, що декілька транспортних вузлів, які перебувають у зоні видимості одне одного, рухаються в одному напрямку та з приблизно однаковими або сумісними швидкісними показниками. Такий підхід обґрунтовано потребою мінімізувати коливання всередині кластера, оскільки узгоджений рух транспортних вузлів дає змогу уникнути швидких втрат на з'єднання через зміну смуги чи розворот.

Однак, у межах міського дорожнього середовища, де вулиці перехрещуються досить часто, а транспортні потоки нерідко мають різні цілі та можуть змінювати напрям під час руху, трапляється, що відносно рідкісна кількість транспортних вузлів рухається довгий проміжок часу чітко в одному й тому ж напрямку. Як наслідок, можливість сформувати стабільну групу за алгоритмом МОСА різко знижується.

Відмічаються невисокі показники ефективності кластеризації саме в міському середовищі, що не свідчить про загальну некоректність алгоритму, а підкреслює його вужчу спеціалізацію в умовах частих змін напрямку. Підтвердження цьому можна побачити в детальних результатах кожного зі сценаріїв симуляції, де помітно, що транспортні вузли в місті надто швидко перестають відповідати вимозі однакового напрямку руху й часто виходять за межі сформованого кластера.

З огляду на це відмічається, що за межами міських вулиць, наприклад, на автострадах або магістралях, де характерним є довготривалий і сталий рух в одному напрямку з меншою кількістю перехресть та розворотів – алгоритм МОСА мав би працювати набагато ефективніше. Там транспортні вузли отримують змогу залишатися згрупованими у кластері впродовж більш тривалого часу, що дає змогу повніше розкрити потенціал цього підходу.

Незважаючи на загалом меншу ефективність у порівнянні з АВСА, МОСА все ж демонструє правильність своїх внутрішніх механізмів: визначення напрямів руху відбувається правильно, формування груп реалізується послідовно. Алгоритм чітко дотримується своїх засадничих правил з певними обмеженнями на міське середовище з його високим рівнем динаміки та непередбачуваних змін.

Аналіз отриманих результатів

В дослідженні приділено увагу аналізу утворення кластерів, які відіграють ключову роль у визначенні ефективності роботи транспортної мережі за різних сценаріїв. Зібрано результати, що відображають співвідношення між кількістю кластерів та кількістю транспортних вузлів у певні моменти симуляції (рис. 6–8 та рис. 10–12). Для більш наочного порівняння побудовано об'єднані графіки для всіх сценаріїв з різною

щільністю (рис. 13–15), де синім кольором представлено загальну кількість транспортних вузлів упродовж часу симуляції, зеленим – кількість кластерів, утворених за алгоритмом МОСА, а фіолетовим – кластери, сформовані за алгоритмом АВСА.

З рис. 13 відмічається, що за алгоритмом МОСА утворено більше кластерів, проте кожен із них найчастіше складається лише з одного транспортного вузла, тобто фактично відбувається надмірне розбиття мережі на велику кількість окремих груп. За алгоритмом АВСА утворено меншу кількість кластерів, проте вони значно більші за розміром, тому що в кожному кластері може перебувати декілька транспортних вузлів одночасно. За відсутності аномалій упродовж усього часу симуляції така структура мережі вказує на стабільні умови, за яких алгоритми кластеризації не зазнають суттєвих перенавантажень й можуть демонструвати свої типові властивості. Отримані результати дають підстави очікувати, що за аналогічних умов триваліші симуляції для $p=0,75$ поведуться подібним чином і збережуть такі ж співвідношення між кількістю кластерів й транспортних вузлів.

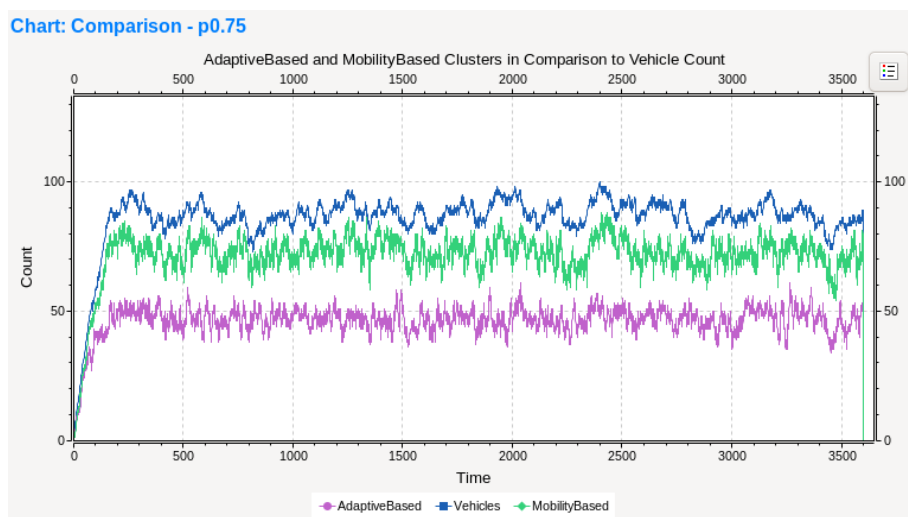


Рис. 13. Порівняльні графіки для сценарію з щільністю $p0,75$

На рис. 14 помітно збільшення кількості транспортних вузлів (на ділянці близько 2500 с), після чого настає період відносної стабілізації. Таку динаміку обумовлено тим, що транспортні вузли з'являються в симуляції не одночасно, а з певним розподілом у часі, внаслідок чого на різних етапах симуляції їх кількість може збільшуватись чи зменшуватись. Далі окремі транспортні вузли досягають кінцевої точки призначення і залишають сценарій.

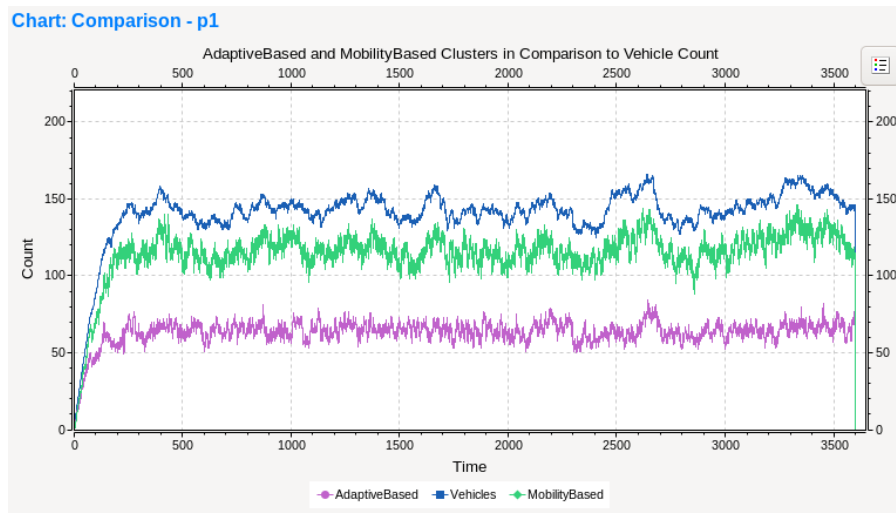


Рис. 14. Порівняльні графіки для сценарію з щільністю $p1$

Кількість кластерів, утворених за досліджуваними алгоритмами, зберігає співвідношення, подібне до сценарію при щільності $p0,75$. Це означає, що з АВСА утворюється менше кластерів, проте більшого розміру, а з МОСА спостерігається формування порівняно дрібних груп. Таким чином, за допомогою обох алгоритмів в цілому кластери сформовано зі збільшенням кількості транспортних вузлів, забезпечуючи достатній рівень кластеризації для підтримки зв'язку та інформаційного обміну.

На рис. 15 відмічаються істотні зміни, зумовлені затором, що виникає в певній частині симуляції. Цей затор перешкоджає просуванню транспортних вузлів і призводить до швидкого накопичення великої їхньої кількості в окремих регіонах.

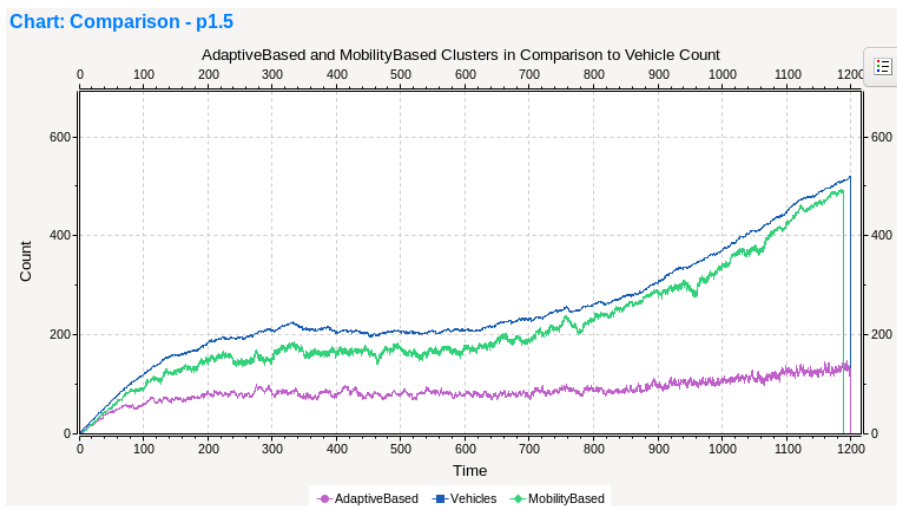


Рис. 15. Порівняльні графіки для сценарію з щільністю $p1,5$

За представленим сценарієм з АВСА демонструється краща здатність до об'єднання транспортних вузлів: коли в певний момент у симуляції перебуває близько 510 транспортних вузлів, алгоритм утворює приблизно 130 кластерів, тобто

можна очікувати, що в середньому в кожному кластері перебуває близько 4-5 транспортних вузлів. Це досить ефективний показник, адже дає змогу зменшити мережне навантаження за рахунок групових обмінів замість безлічі точкових повідомлень між окремими транспортними вузлами.

За МОСА формується істотно більша кількість кластерів, яка досягає приблизно 490 для 510 транспортних вузлів, фактично в багатьох випадках створюючи кластери з одним-двома транспортними вузлами. Такий підхід зумовлює підвищену кількість міжкластерних обмінів і може знижувати ефективність у системі з високим навантаженням, оскільки не дає змоги значно скоротити обсяги службових повідомлень. Висока концентрація транспортних вузлів і специфіка алгоритму МОСА спричиняють надмірне розбиття мережі, що погіршує узгодженість дій у транспортних потоках та збільшує вірогідність перевантаження каналу.

Узагальнення даних для трьох сценаріїв різної щільності показує, що алгоритм АВСА, як правило, забезпечує краще згрупування транспортних вузлів у спільні кластери, що може бути корисним за умови масових скупчень на дорогах. Алгоритм МОСА має власні переваги в інших аспектах, однак у сценарії зі щільністю $p_{1,5}$, де виникає затор і кількість транспортних вузлів досягає найвищих значень, проявляється схильність до «роздроблення» транспортного потоку на велику кількість невеликих кластерів. Це свідчить про те, що вибір конкретного алгоритму залежить від пріоритетів проекту та характеру мережі.

Під час симуляцій проведено збір метрик, які використано для деталізованого аналізу ефективності та особливостей роботи транспортних вузлів у мережі. Збір і початковий аналіз метрик кількості транспортних вузлів відносно кількості сформованих кластерів (згідно рис. 6–8 та рис. 9–12) виконано в середовищі OMNeT++. Подальшу розгорнуту обробку результатів виконано в середовищі Excel для застосування стандартних аналітичних інструментів та гнучких методів агрегування даних, що спрощує підготовку розгорнутих звітів і візуалізацій для аналізу досліджень.

З отриманих результатів симуляцій виділено дані щодо створених та отриманих повідомлень двох типів: Basic Safety Messages (BSM), які передають інформацію про стан, швидкість та інші ключові параметри транспортного вузла, і WAVE Short Message (WSM), які використовуються для обміну короткими службовими повідомленнями між вузлами мережі. Ці два різновиди пакетів стали основою для оцінки загального обсягу трафіку в мережі та інтенсивності обміну даними в різних умовах. У табл. 4 наведено підсумкові значення кількості отриманих і створених пакетів для різних сценаріїв, що відрізнялись налаштуваннями щільності транспортного потоку (позначеними як $p_{0,75}$, p_1 та $p_{1,5}$).

Узагальнені дані свідчать про суттєві відмінності в інтенсивності обміну повідомленнями залежно від обраного алгоритма кластеризації й щільності транспортного потоку. Оскільки маршрут і швидкість руху транспортного вузла у сценаріях подібні, але щільність руху змінюється, то відмічається, як збільшення

кількості транспортних вузлів впливає на загальний обсяг трафіку та можливості утворення кластерів.

Таблиця 4. Кількість пакетів під час симуляції

Повідомлення	ABCA			MOCA		
	p0,75	p1	p1,5	p0,75	p1	p1,5
Отримані BSM	320450	1127564	2330139	320732	1129061	2266799
Отримані WSM	107217	318556	523297	51567	1241166	1062367
Створені BSM	308768	507111	301839	308757	507104	216170
Створені WSM	137296	225009	141036	927003	1522383	888975

Для візуалізації отриманих результатів побудовано діаграми, які відображають графічне порівняння загального обсягу пакетів для трьох варіантів симуляцій із різними рівнями щільності транспортного потоку. Діаграми містять дані про загальну кількість створених і отриманих пакетів кожного типу, що дозволяє зробити висновки щодо їхнього характеру та роботи алгоритмів у кожному сценарію (рис. 16–18). Показано дані для низької, середньої та високої щільності, що дає змогу побачити, як саме змінюється інтенсивність створення й отримання повідомлень із підвищенням кількості транспортних вузлів у мережі. Синім кольором відображено повідомлення ABCA, а сірим – повідомлення MOCA.

На рис. 16 показано, що для BSM різниця між алгоритмами ABCA та MOCA є відносно незначною. Загальні обсяги як створених, так і отриманих BSM повідомлень перебувають приблизно на одному рівні. Це свідчить про подібну інтенсивність обміну базовими даними за меншої щільності транспортного потоку.

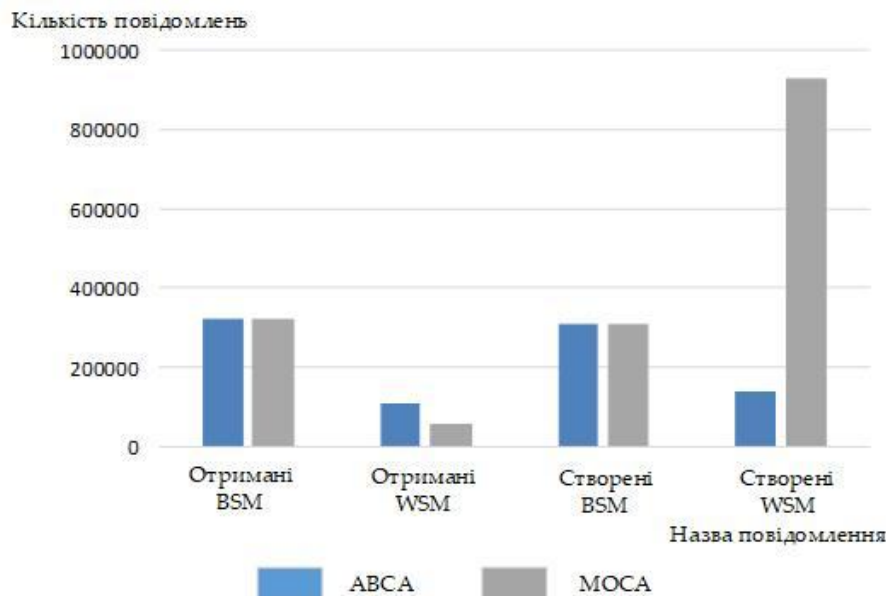


Рис. 16. Діаграма кількості пакетів зі щільністю p0,75

Однак для WSM повідомлень спостерігаються суттєві відмінності. При використанні МОСА виявляється приблизно вчетверо більша кількість отриманих WSM повідомлень порівняно з АВСА, і майже у шість разів більший обсяг створених WSM. Така різниця може пояснюватися тим, що МОСА генерує та розсилає службові (короткі) повідомлення набагато частіше завдяки специфіці механізмів кластеризації або підтримці зв'язку між вузлами. Це пов'язано з тим, що МОСА генерує більше критеріїв під час формування кластерів.

На рис. 17 показано загальне збільшення кількості BSM повідомлень, але попри збільшення, суттєвої різниці між АВСА та МОСА не виникає, результати є подібно-схожими. Збільшення щільності руху в цьому сценарії, яке характеризується підвищенням кількості транспортних вузлів, призвело до очікуваного росту кількості створених й отриманих повідомлень.

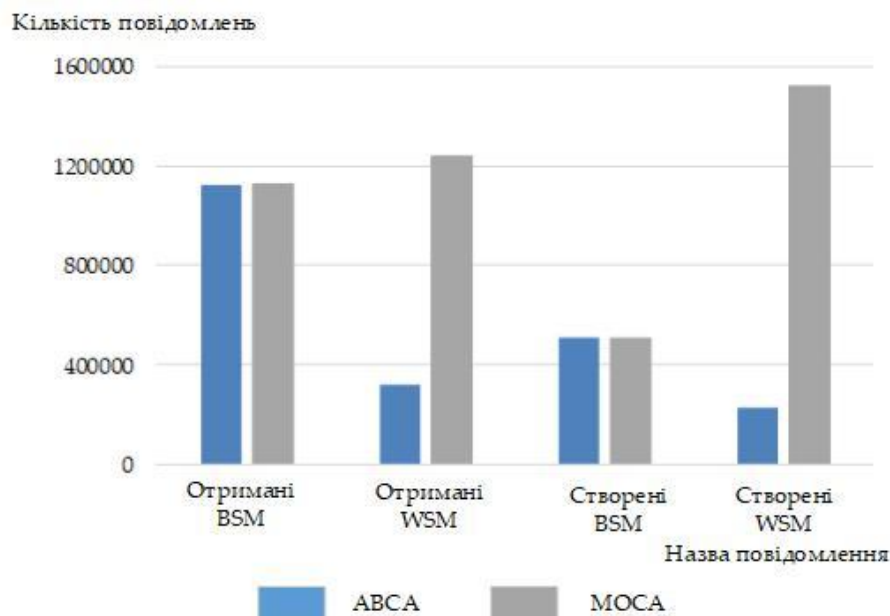


Рис. 17. Діаграма кількості пакетів зі щільністю p_1

Однак, структура взаємодії та розподіл повідомлень між алгоритмами залишаються подібними до тих, що спостерігалися за меншої щільності $p_{0,75}$. Це свідчить про те, що основні мережні механізми не зазнають значних змін навіть при зростанні навантаження на мережу.

Подібність результатів для різної щільності, але схожих алгоритмів, дає змогу зробити припущення, що за певних умов АВСА та МОСА мають схожу продуктивність у контексті обміну базовими повідомленнями.

Сценарій зі щільністю $p_{1,5}$ (рис. 18) дає можливість перевірити, чи зберігатиметься така тенденція при подальшому підвищенні транспортного навантаження, та чи зможуть обидва алгоритми забезпечувати аналогічну ефективність у більш інтенсивних умовах.

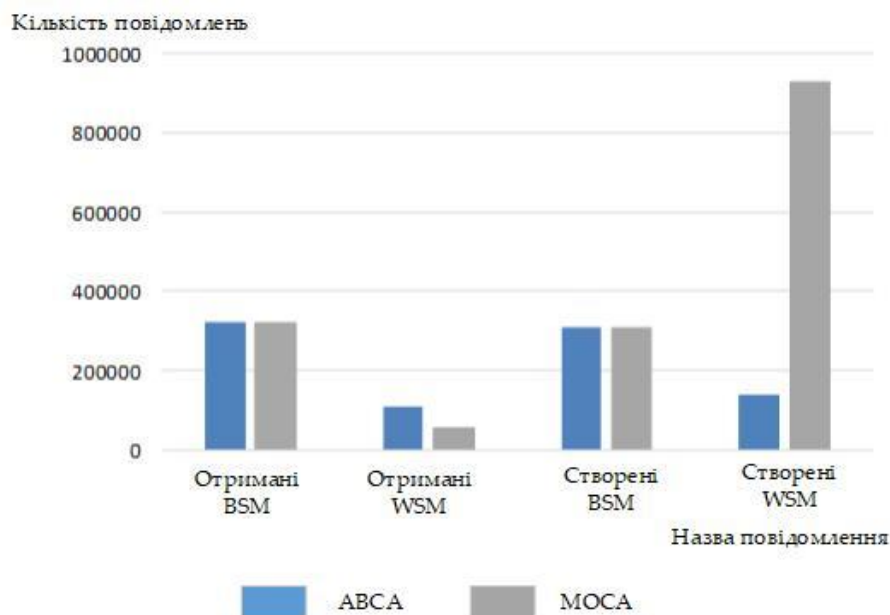


Рис. 18. Діаграма кількості пакетів зі щільністю p1,5

В результаті аналізу виявлено значні зміни у співвідношеннях між WSM та BSM повідомленнями, що вказує на вплив високої щільності транспортного потоку на динаміку мережної взаємодії.

У даному сценарії підвищення щільності руху призводить до виникнення затору в певний момент симуляції. Ця ситуація унеможливує подальший рух транспортних вузлів до їхніх точок призначення, внаслідок чого кількість транспортних вузлів у межах симуляційного простору починає зростати за арифметичною прогресією. Виникнення затору створює високу концентрацію транспортних вузлів у певних частинах мережі, що стимулює інтенсивний обмін повідомленнями між вузлами мережі. Такий ефект можна вважати критичним моментом для оцінки ефективності алгоритмів кластеризації в умовах реального перевантаження.

При використанні алгоритму ABCA спостерігається незначне збільшення кількості створених та отриманих BSM повідомлень у порівнянні з MOCA. Це свідчить про те, що даний алгоритм кластеризації в певній мірі стабільніше обробляє базові повідомлення в умовах високої щільності, хоча різниця не є суттєвою. Щодо WSM повідомлень, то відзначено певну особливість – співвідношення отриманих WSM повідомлень при ABCA зменшилось, тоді як співвідношення створених WSM повідомлень залишилось приблизно на тому ж рівні, що й для менш насичених сценаріїв. Такі відмінності у динаміці WSM повідомлень можна пояснити особливостями алгоритмів у контексті управління службовим трафіком. Алгоритм MOCA генерує значно більше службових повідомлень у відповідь на підвищення щільності та інтенсивності руху, що може свідчити про його агресивнішу стратегію обміну даними в умовах перевантаження мережі. Натомість алгоритм ABCA демонструє стриманіший підхід, який може бути більш вигідним для уникнення перевантаження мережі.

Аналіз результатів симуляцій для трьох сценаріїв з різною щільністю транспортного потоку виявив низку важливих висновків щодо ефективності та особливостей роботи алгоритмів ABCA та МОСА. У сценарії з низькою щільністю ($p_{0,75}$) відзначається схожість між обома алгоритмами у створенні та отриманні BSM повідомлень, що вказує на аналогічну продуктивність у передачі базових даних безпеки. Однак, значна різниця спостерігається у створенні та отриманні WSM повідомлень: алгоритм МОСА демонструє істотно вищу інтенсивність обміну службовими даними, що може бути наслідком специфічності його стратегії кластеризації.

При переході до середнього рівня щільності (p_1) загальна кількість BSM та WSM повідомлень зростає, що є очікуваним результатом через збільшення кількості транспортних вузлів. У цьому сценарії структура взаємодії між вузлами залишається стабільною, а відмінності між алгоритмами продовжують бути мінімальними для BSM повідомлень, тоді як у WSM повідомленнях алгоритм МОСА продовжує демонструвати вищу інтенсивність. Це свідчить про те, що при середніх навантаженнях обидва підходи зберігають свої основні характеристики.

Сценарій із високою щільністю ($p_{1,5}$) виявляє критичні відмінності між алгоритмами. Виникнення затору призводить до суттєвого зростання кількості транспортних вузлів у симуляції, що викликає значну зміну у співвідношенні створених та отриманих повідомлень. МОСА генерує значно більше WSM повідомлень, що може створювати додаткове навантаження на мережу, тоді як ABCA демонструє більш збалансований підхід до обміну даними. Це може свідчити про перевагу ABCA у критичних умовах із піковим навантаженням.

Таким чином, отримані результати роботи дозволили надати рекомендації щодо їхнього використання в різних умовах транспортного потоку:

- 1) За алгоритмом МОСА забезпечується інтенсивніший обмін службовими повідомленнями, що може бути корисним для складних сценаріїв координації. Тому відмічається можливість формування стабільної групи кластерів саме за межами міських вулиць – на автострадах або магістралях, де характерним є довготривалий і сталий рух транспортних вузлів в одному напрямку з меншою кількістю перехресть та розворотів.

- 2) Алгоритм ABCA демонструє більш стабільну роботу у критичних умовах перевантаження. Тому відмічається, що використання цього алгоритму є ефективним саме для міського середовища.

Загалом за результатами досліджень різних механізмів та алгоритмів кластеризації розглядаються певні показники продуктивності транспортної мережі VANET, серед яких: тривалість служби кластера й життя членів кластера, кількість кластерів тощо.

Для порівняння можна скористатися результатами досліджень інших механізмів кластеризації. За результатами досліджень алгоритму кластеризації SCVAN-BKM визначено середній термін служби кластера, який відноситься до очікуваного часу, протягом якого кластер залишається стабільним та працездатним до суттєвих змін в мережі. Відмічено, що цей показник становить 80 с для мережі, яка складається з близько 100 транспортних вузлів [3]. Дослідження алгоритму кластеризації ANFC-QGSOR по-

казало середню тривалість життя голови кластера від 189 до 186 с при різних швидкостях транспортного засобу, у той час як для алгоритму кластеризації SACONET цей показник склав від 121 до 109 с [4]. Щодо середньої кількості кластерів, то відмічається їхня кількість 5-6 для алгоритму ANFC-QGSOR та 9 – для алгоритму SACONET. Вважається, що кращий показник повинен бути найменшим [4]. Дослідження алгоритму ROAONC показало, що при різній кількості транспортних вузлів результат формування кластерів склав приблизно 4:1 порівняно з алгоритмами кластеризації SACONET та CAMONET [7].

Порівняння щодо утворення кластерів досліджуваних в роботі алгоритмів кластеризації ABSCA та MOCA з іншими алгоритмами показало, що за алгоритмом MOCA утворено більше кластерів, проте кожен із них найчастіше складається лише з одного транспортного вузла, тобто фактично відбувається надмірне розбиття мережі на велику кількість окремих груп. За алгоритмом ABSCA демонструється краща здатність до об'єднання транспортних вузлів, проте вони значно більші за розміром, що в підсумку складає приблизно 5:1, що є кращим результатом. Це досить ефективний показник, він збігається, а в деяких випадках навіть кращий за інші алгоритми при певній щільності транспортного потоку. Щодо тривалості роботи кластерів, то відмічено підтримку їхньої роботи протягом всього часу симуляції – від 1200 с до 3600 с, що підтверджує стабільність їхньої роботи.

Висновки

Розглянуто актуальне питання підвищення якості дорожнього руху в транспортних мережах VANET. Одним з підходів, що демонструють високу ефективність в умовах динамічних мереж VANET, є використання та дослідження алгоритмів кластеризації, оскільки вони ґрунтуються на параметрах мобільності транспортних вузлів.

Проведено дослідження алгоритмів кластеризації ABSCA та MOCA, що включає: вибір змінних для опису необхідного кластеру та проведення етапів кластеризації – ініціалізації, вибору головного кластера, анонсування ролі, оновлення інформації та підтримки структури кластерів. Для оцінки змін завантаженості мережі в часі та впливу на роботу алгоритмів кластеризації проведено збір статистичних даних про кількість існуючих кластерів та кількість транспортних вузлів у кожний момент часу. Розроблено коди реалізації логіки збору статистики та коди для роботи зазначених алгоритмів.

Проведено ряд симуляцій з різними параметрами щільності транспортного потоку і різною тривалістю, що дозволило змодельовати сценарії з утворенням затору у транспортному потоці для оцінки зміни динаміки симуляції. Отримано результати симуляції з відображенням ключових параметрів, що аналізуються протягом усього часу симуляції: загальної кількості транспортних вузлів та кількості кластерів, які формувалися в процесі роботи алгоритмів кластеризації. Відмічено успішний результат об'єднання транспортних вузлів у групи та успішне формування кластерів.

Проведено аналіз за результатами симуляції: виділено дані щодо створених та отриманих повідомлень BSM та WSM, сформовано підсумкові значення кількості

отриманих й створених пакетів для різних сценаріїв з різними щільностями транспортного потоку і алгоритмами формування кластерів. Узагальнені дані свідчать про суттєві відмінності в інтенсивності обміну повідомленнями. За результатами аналізу проведено оцінку ефективності роботи транспортної мережі за різних сценаріїв з отриманням результатів, що відображають співвідношення між кількістю кластерів для досліджуваних алгоритмів та кількістю транспортних вузлів у певні моменти часу при різній щільності транспортного потоку.

Показано, що алгоритм АВСА демонструє кращу здатність до об'єднання транспортних вузлів, а за алгоритмом МОСА формується істотно більша кількість кластерів. Таким чином, вибір алгоритму залежить від пріоритетів проекту та характеру мережі: якщо необхідно витримувати пікові навантаження з мінімізацією службового трафіку, то алгоритм АВСА може бути кращим варіантом, а алгоритм МОСА з його підвищеною інтенсивністю обміну повідомленнями варто розглядати, коли важлива оперативна взаємодія між вузлами, попри збільшення кількості кластерів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в: успішному формуванні транспортних вузлів в кластери; можливості міжкластерних обмінів службовими повідомленнями, необхідних для підтримки зв'язку; стабільність роботи кластеру за весь час симуляції; результативність роботи алгоритмів кластеризації. Це сприяє ефективній організації трафіку у режимі реального часу.

Надано рекомендації щодо використання алгоритмів кластеризації МОСА та АВСА в різних умовах транспортного потоку та визначено, що в цілому за допомогою обох алгоритмів забезпечено достатній рівень кластеризації для підтримки зв'язку та інформаційного обміну.

Список літератури

1. Mukhtaruzzaman, M., Atiquzzaman, M. (2020), "Clustering in vehicular ad hoc network: Algorithms and challenges", *Computers & Electrical Engineering*, No. 88, P. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106851>.
2. Alabbas H., Huszak, A. A. (2020), "A New Clustering Algorithm for Live Road Surveillance on Highways based on DBSCAN and Fuzzy Logic", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, No. 11(8), P. 580–587. DOI: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110872>.
3. Gayathri, M., Gomathy, C. (2024), "SCVAN-BKM: Swarm clustering for vehicular ad hoc network with a secure blockchain-based key management scheme", *Ain Shams Engineering Journal*, No. 15(12), P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.103094>.
4. Giridhar, K., Anbuananth, C., Krishnaraj, N. (2023). "Energy efficient clustering with Heuristic optimization based Routing protocol for VANETs", *Measurement: Sensors*, No. 27, P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100745>.
5. Bhatia, T. K., Ramachandran, R. K., Doss, R., Pan, L. (2021), "Generating the appropriate route for the detection of data congestion in VANETs using a clustering approach", *Proceedings of the 2021 11th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)*, Noida, India, P. 636–642. DOI: <https://doi.org/10.1109/Confluence51648.2021.9376877>.

6. Kandali, K., Bennis, L., Bennis, H. (2021), "A new hybrid routing protocol using a modified K-means clustering algorithm and continuous Hopfield network for VANET", IEEE Access, No. 9, P. 47169–47183. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3068074>.
7. Konduru, S., Sathya, M. (2022), "Remora optimization algorithm-based optimized node clustering technique for reliable data delivery in VANETs", International Journal of Intelligent Networks, No. 3, P. 74–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijin.2022.07.002>.
8. Khan, M. F., Aadil, F., Maqsood, M., Khan, S. Bukhari, B. H. (2018), "An efficient optimization technique for node clustering in VANETs using gray wolf optimization", KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS), No. 12(9), P. 46–58. DOI: <http://doi.org/10.3837/tiis.2018.09.007>.
9. Sellami, L., Alaya, B. (2021), "SAMNET: self-adaptative multi-kernel clustering algorithm for urban VANETs", Vehicular Communications, No. 29, P. 2–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2021.100332>.
10. Shah, Y. A., Habib, H. A., Aadil, F., Khan, M. F., Maqsood, M., Nawaz, T. (2018), "CAMONET: moth-flame optimization (MFO) based clustering algorithm for VANETs", IEEE Access, No. 6, P. 48611–48624. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2868118>.
11. Aadil, F., Bajwa, K. B., Khan, S., Chaudary, N. M., Akram, A. (2016), "CACONET: ant colony optimization (ACO) based clustering algorithm for VANET", PLoS One, No. 11(5), e0154080. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154080>.
12. Ahsan, W., Khan, M. F., Aadil, F., Maqsood, M., Ashraf, S., Nam, Y., Rho, S. (2020), "Optimized node clustering in VANETs by using meta-heuristic algorithms", Electronics, No. 9(3), P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9030394>.
13. Ishtiaq, A., Ahmed, S., Khan, M. F., Aadil, F., Maqsood, M., Khan, S. (2019), "Intelligent clustering using moth flame optimizer for vehicular ad hoc networks", International Journal of Distributed Sensor Networks, No. 15(1), P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1177/1550147718824460>.
14. Abassi, R., Ben Chehida, D. A., Sauveron, D. (2020), "TSME: a trust-based security scheme for message exchange in vehicular Ad hoc networks", Human-Centric Computing and Information Sciences, No. 10(1), P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13673-020-00248-4>.
15. Syfullah, M., Lim, J. M., Siaw, F. L. (2019), "Mobility-Based Clustering Algorithm for Multimedia Broadcasting over IEEE 802.11p-LTE-enabled VANET", KSII Transactions on Internet and Information Systems, No. 13(3), P. 1213–1237. DOI: <http://doi.org/10.3837/tiis.2019.03.006>.
16. Соловійов, П. В., Токар, Л. О. (2024), "Кластеризація в мережах VANET", Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем (ПРІТС-2024): мат. XVI міжн. наук.-техн. конф. студ. та асп.; К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, С. 292.
17. Соловійов, П. В., Токар, Л. О. (2024), "Дослідження алгоритму адаптивної базової кластеризації у мережі за технологією VANET", Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика: мат. X Всеукр. наук.-практ. конф.; Полтава: Нац. ун-т Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка, С. 94–96.
18. Mwangi, A., Mwangi, W., Kiura, S. (2022), "Performance Evaluation of IEEE 802.11p Enhanced Distributed Channel Access based on Vehicular Ad-hoc Network Characteristics", East African Journal of Information Technology, No. 5(1), P. 106–130. DOI: <https://doi.org/10.37284/eajit.5.1.835>.
19. Karthikeyan, H. et al. (2021), "Adaptive Clustering Algorithm for Stable Communication in Vanet", Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT), No. 12(9), P. 1778–1785. URL: <https://turcomat.org/index.php/turkbilmat/article/view/3597>.