

А. А. Коваленко, Г. А. Кучук

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МЕТОД АДАПТИВНОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ МОБІЛЬНИХ ВУЗЛІВ ТУМАННОГО ШАРУ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Анотація. Актуальність. Основним критерієм кластеризації туманних пристроїв є близькість розташування туманних вузлів, що входять до кластера. Але при наявності мобільних вузлів структура кластера може порушитися внаслідок виходу будь-якого мобільного вузла за межі кластера. Це призведе до непередбачених затримок при обробці даних Інтернету речей. Тому для таких систем додається критерій стійкості структури кластера. **Предметом дослідження** є методи кластеризації туманного шару Інтернету речей з високою щільністю. **Метою дослідження** є підвищення стійкості мобільних компонентів туманного шару за рахунок модифікації методу кластеризації за рахунок розробки методу формування стійкого мобільного кластеру. **Завдання дослідження:** розробка підходу до формування архітектури мобільної компоненти, моделі та методу забезпечення стійкості мобільного кластера туманного шару Інтернету речей з високою щільністю. **Результати дослідження.** Для організації взаємодії мобільних пристроїв розроблено архітектуру мобільної компоненти туманного шару, побудовану з урахуванням його децентралізованої структури та особливостей функціонування мобільних пристроїв Інтернету речей. Запропонована архітектура має чотири рівні та передбачає виділення на нижньому рівні окремих мобільних кластерів туманних пристроїв. Для дослідження процесів формування мобільних кластерів розроблено відповідну модель, у якій враховано випадковий характер переміщення пристроїв Інтернету речей. Моделювання просторового розподілу мобільних компонентів здійснюється на основі точкового процесу Томаса. На основі запропонованої моделі виконано модифікацію алгоритму кластеризації FOREL, у якій визначення положення центра кластера здійснюється з використанням вагових коефіцієнтів, що характеризують стійкість його компонентів. **Висновки.** Результати моделювання засвідчили підвищення стійкості сформованих мобільних кластерів у середовищах із високою та надвисокою щільністю пристроїв. Встановлено, що зі збільшенням середнього відносного відхилення фактичних траєкторій руху пристроїв від запланованих стійкість кластерної структури зростає. Така поведінка пояснюється зміщенням центра кластера у напрямку найбільш нестійких його компонентів, що забезпечує адаптацію кластерної структури до змін просторового розташування мобільних пристроїв. Запропонований метод доцільно застосовувати для організації кластеризації мобільних компонентів туманного шару Інтернету речей за умов, коли середнє відхилення руху пристроїв від заданих траєкторій не перевищує 20 % радіуса кластера.

Ключові слова: мобільний пристрій; інтернет речей, кластеризація, туманний шар, точковий процес Томаса.

1. Вступ

1.1 Актуальність дослідження

Сучасний Інтернет речей (IoT) базується на технології хмарних обчислень. Однак, в останні роки виникли труднощі, які є наслідком таких факторів [1]: наявність географічного розподілу компонент IoT; збільшення мережних затримок; висока вартість каналів зв'язку; наявність мобільності пристроїв IoT. Більшість з цих труднощів були вирішені введенням додаткового шару, що був названий туманними обчисленнями [2].

Туманні обчислення є децентралізованою підмережею екосистеми IoT, що знаходиться в найбільш ефективній точці між джерелами даних і хмарою. Туманні обчислення є перспективною концепцією, яка припускає наближення обробки даних до кінцевих пристроїв мереж і є подальшим розвитком хмарної концепції [3, 4]. Пристрої туманного шару використовуються там, де дані потрібно аналізувати дуже швидко. Туманні вузли забезпечують часткову обробку та тимчасове зберігання даних перед їх надсиланням у хмару. Середовище туманних обчислень може використовувати багато пристроїв і цілей залежно від підтримуваної системи IoT. Також туманні обчислення забезпечують аналіз даних у режимі, наближеному до реального часу, що є першочерговою потребою для мінімізації затримки.

Крім того, будь-який туманний вузол може бути реалізованим за допомогою мобільного пристрою IoT. Зазвичай, мобільні пристрої IoT підпорядковані якійсь низці правил, але у більшості випадків траєкторія їхнього руху є випадковою величиною [5].

У мережах Інтернету речей з високою щільністю туманний шар зазвичай розбивається на низку кластерів [6, 7]. Зазвичай, основним критерієм кластеризації є близькість розташування туманних вузлів, що входять до кластера. Але при наявності в інфраструктурі туману мобільних вузлів структура кластера може порушитися внаслідок виходу якогось мобільного вузла за межі кластера [8]. Це призведе до непередбачених затримок при обробці даних IoT. Тому для систем IoT з високою щільністю при проведенні кластеризації необхідно враховувати такий критерій як стійкість структури кластера.

Отже, для усунення непередбачених часових затримок при обробці даних IoT з високою щільністю необхідно формувати у туманному шарі стійкі мобільні кластери.

1.2 Аналіз літературних джерел і визначення проблеми

Проблеми кластеризації у середовищах, що мають високу щільність елементів, доволі часто розглядаються у сучасних наукових дослідженнях. При розгляді цієї проблеми треба враховувати, що туманний шар мережі підтримки Інтернету речей

практично завжди має розподілену децентралізовану структуру, але завдання кластеризації його обчислювальних компонент суттєво ускладнюється у випадку наявності мобільних туманних компонент. Розглянемо наукові роботи за даною тематикою, які можна застосувати для туманного шару.

При реалізації методики кластеризації у туманному шарі, розглянутої в статті [9], враховується динаміка мобільних вузлів туманного шару. Крім того, використовується апарат сигмоїдальних нейронних мереж. Але група мобільних пристроїв не розглядається окремо від статичних вузлів, відповідно питання стійкості сформованих кластерів не розглядаються. Також у статті [10] питання кластеризації не орієнтовані на розгляд стійкості віртуальних кластерів, що містять мобільні пристрої IoT. У дослідженні, наведеному у статті [11], пропонується багаторівнева архітектура децентралізованої системи. У даній архітектурі мобільні та статичні кластери пристроїв туманного середовища IoT можуть розглядатися окремо. Це сприяє зменшенню затримок при обробці даних. Але сформовані кластери не враховують ймовірне відхилення мобільних елементів від запланованого руху. Такі відхилення враховуються у дослідженні, наведеному у статті [12]. Дослідження спрямоване на управління ресурсами у розподілених системах, але орієнтоване тільки на нескладні топології системи. Тому його не можна застосовувати для систем IoT з високою та надвисокою щільністю, як і алгоритм, запропонований у [13]. Даний алгоритм враховує особливості мобільних пристроїв IoT, оптимізує їх продуктивність та енергоспоживання, розрахований тільки на нескладні топології розглядаємої інфраструктури.

У статті [14] наведено результати досліджень щодо задіяння туманних мобільних компонент для виконання інтелектуальних застосунків. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані із стійкістю мобільних компонент. Причиною цього є орієнтація дослідження на захищеність задіяних мобільних елементів. Один із можливих варіантів урахування питань стійкості мобільних компонент запропонований у статті [15]. В даному дослідженні розподілена мобільна компонента туманного шару використовується для вирішення оперативних завдань промислового IoT (IIoT). При цьому одним із головних показників ефективності запропонованого підходу є стійкість розподілених складових мобільної компоненти, але не враховується ймовірне відхилення задіяних мобільних пристроїв IIoT від запланованого руху. Це може призвести до руйнування структури мобільної компоненти. Такі ж проблеми можливі і при реалізації системи управління доступом до мобільних компонент туманного шару, запропонованої в [16]. Крім того, у розглянутих роботах проведені дослідження базуються на статичній кластеризації, що виконана за територіальною ознакою. При цьому сформовані кластери попередньо не аналізувались на стійкість.

Зазначимо, що запропонований у статті [17] декомпозиційний підхід можна застосовувати при

проведенні кластеризації туманного шару систем IoT високої щільності. у. Але даний підхід реалізований тільки для статичної інфраструктури туманного середовища. Для врахування наявних мобільних компонент можна використовувати алгоритм перенесення обчислювального навантаження, наведений у [18]. Даний алгоритм орієнтований на зменшення затримок під час виконання завдань у розподілених системах, але не враховує специфічні характеристики задіяної інфраструктури туманного шару систем IoT високої або надвисокої щільності.

Отже, розглянуті наукові роботи [9–18] при кластеризації туманного шару Інтернету речей недостатньо враховують характерні особливості IoT з високою щільністю. Крім того, у більшості робіт для мобільних компонент не враховується такий критерій як стійкість туманного середовища. Це може призвести до руйнування структури мережі туманних пристроїв. Тому доцільним є проведення дослідження, присвяченого підвищенню стійкості мобільних компонент туманного шару за рахунок модифікації методу кластеризації.

1.3 Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є підвищення стійкості мобільних компонент туманного шару за рахунок модифікації методу кластеризації за рахунок розробки методу формування стійкого мобільного кластеру. Це дасть можливість підвищити стійкість групи мобільних пристроїв IoT, задіяних у туманному шарі, за рахунок наближення нестійких елементів до центрів кластерів.

Для досягнення поставленої мети дослідження треба вирішити такі часткові завдання:

- розробити підхід до формування архітектури мобільної компоненти туманного шару Інтернету речей з високою щільністю;
- розробити модель мобільного кластера туманного шару Інтернету речей з високою щільністю;
- розробити та дослідити алгоритм забезпечення стійкості мобільного кластера туманного шару Інтернету речей з високою щільністю.

2. Матеріали і методи дослідження

В роботі розглядаються мобільні пристрої IoT, які є складовими туманного шару. Дані пристрої зазвичай мають суттєво обмежені обчислювальні ресурси [19, 20]. При проведенні дослідження були враховані такі об'єктивні умови: туманний шар містить територіально рознесені мобільні компоненти, які складаються з пристроїв IoT; мобільні пристрої IoT в процесі руху прагнуть зберегти його параметри; практично всі мобільні пристрої IoT, що використовуються у туманному шарі, мають обмежені обчислювальні ресурси, а система пристроїв IoT має високу щільність у тривимірному просторі, що розглядається.

Для реалізації запропонованого методу кластеризації туманного шару Інтернету речей була застосована низка різноманітних методів. При розробці моделі туманного шару для опису

взаємного положення елементів мережі використовувалась модель точкового поля Томаса з ефектами випадкових скупчень [21]. В даній моделі передбачається, що в деякій області простору D випадково розподілені точкові об'єкти $c_1, c_2, \dots, c_n$. Кожний з цих об'єктів може розглядатися як деякий центр скупчення. Відповідно, кожному центру скупчення c_i ставиться у відповідність деяка випадкова величина y_i , яка характеризує кількість об'єктів, що входять до нього. Випадкові величини $y_1, y_2, \dots, y_n$ зазвичай вважаються взаємно незалежними і однаково розподіленими. Ефекти угруповання точкових об'єктів зазвичай спостерігаються у околі центрів скупчення. Положення кожного елемента у скупченні характеризується тривимірним нормальним розподілом в області простору D .

При розробці метода забезпечення стійкості кластера туманного шару були розглянуті центроїдні алгоритми кластеризації [22]. При формуванні кластера дані алгоритми зазвичай як критерій використовують мінімізацію величини Θ – сумарної відстані від центра кластера до його елементів:

$$\Theta \rightarrow \min; \Theta = \sum_{i=1}^k d_{i0}, \text{ pos}(C) \in D, \quad (1)$$

$$k \in \overline{1, n}, i \in \overline{1, k},$$

де C – центр кластера, d_{i0} – відстань від i -го елемента до центру кластера, k – кількість елементів в кластері, n – кількість елементів множини, що підлягає кластеризації.

Мінімізація функції (1) проводиться за рахунок вибору центрів кластерів, котрі визначаються як координати центру мас:

$$C = (x_c, y_c, z_c),$$

$$x_c = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{i0}; \quad y_c = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_{i0}; \quad z_c = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k z_{i0}, \quad (2)$$

де (x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}) – просторові координати i -го елемента кластера.

В якості базового алгоритму кластеризації розглядався центроїдний алгоритм FOREL, який використовується у багатьох системах підтримки IoT [23]. Алгоритм надає можливість операцій над центрами кластерів, які відомі у процесі роботи алгоритму. Після виконання алгоритму над множиною отриманих кластерів можна робити деякі дії. Так, можна обрати найбільш репрезентативні об'єкти із кожного кластера. Можна вибирати центри кластерів або кілька об'єктів із кожного кластера, враховуючи апіорні знання про необхідну репрезентативність вибірки. Отже, з готової кластеризації маємо можливість будувати найбільш репрезентативну вибірку. Також можливо переформування отриманої множини кластерів у багаторівневу структуру з використанням методу найкоротшого незамкненого шляху [24].

Головна властивість алгоритму – кількість кластерів заздалегідь не визначена. Кожен кластер є шаром, радіус якого визначений заздалегідь. В

результаті виконання алгоритму кожний j -й із m отриманих кластерів містить k_j елементів. Мінімізації належить такий функціонал:

$$Func = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{k_j} \rho(e_i, C_j) \rightarrow \min, \quad \forall (e_i, C_j)$$

де $\rho(e_i, C_j)$ – значення відстані елемента e_i від центра кластера C_j , до якого він належить при поточному розподілі. Порядок дій алгоритму описаний нижче.

1. Задаємо вхідне значення радіусу R .

2. Обираємо довільну точку простору та додаємо новий об'єкт F .

3. Формуємо поточну множину K , що складається із всіх об'єктів, до яких відстань від F є меншою ніж R .

4. Знаходимо центр мас всіх об'єктів із множини K ($\text{card } K=k$), котрий буде співпадати для об'єктів IoT з центром мас, тобто:

$$x_c = \sum_{e \in K} x_e / k, \quad y_c = \sum_{e \in K} y_e / k, \quad z_c = \sum_{e \in K} z_e / k.$$

Далі до отриманого нового центру мас переноситься об'єкт F . Коректуємо значення радіусу R за допомогою коефіцієнту β ($0,5 < \beta \leq 1$): $R = \beta \cdot R$ та переходимо до кроку 3. Цикл із кроків 3 та 4 повторюється, поки множина K не стабілізується.

5. Коли множина K стабілізується, вона оголошується новим кластером. Об'єкти, що потрапили до K , видаляються для розглядання із вибірки, що кластеризується.

6. У випадку, якщо розглядаєма множина об'єктів IoT не порожня, повертаємося до кроку 1, відновлюючи значення радіусу R . У іншому випадку даний алгоритм закінчує роботу.

Для оцінки ефективності кластеризації використовувався показник стійкості системи m мобільних кластерів [25]:

$$\eta = \max \left(P_j^- \mid j \in \overline{1, m} \right), \quad (3)$$

де P_j^- – ймовірність того, що за фіксований проміжок часу структура j -го кластера буде зруйнована, тобто, чим менше даний показник, тим система стійкіша.

3. Результати розробки і дослідження методу адаптивної кластеризації мобільних вузлів туманного шару

3.1 Формування архітектури мобільної компоненти туманного шару

Стрімке поширення технологій Інтернету речей зумовило подальший розвиток його архітектури та появу туманного шару [26]. За своїм функціональним призначенням він розташований між хмарною інфраструктурою, представленою центрами обробки даних та кінцевими пристроями і сенсорами Інтернету речей. Основні архітектурні принципи хмарних обчислень, застосовувані для забезпечення функціонування Інтернету речей, можуть бути поширені й на туманну модель обчислень [27, 28]. Водночас практична реалізація такої архітектури є

складнішою, вважаючи як на розподілений характер туманного шару, так й на обмежені ресурси значної частини його вузлів. Взаємодія з хмарними центрами обробки даних здійснюється з використанням розподіленої децентралізованої інфраструктури, яка виконує функції ядра туманного шару [29, 30]. У межах такої інфраструктури формується єдине середовище доступу та агрегування, до якого підключаються вузли Інтернету речей, що володіють певними обчислювальними можливостями. Використання цих ресурсів дає змогу перенести частину обчислювальних операцій із хмарного рівня ближче до джерел формування даних.

Функціональну структуру апаратної платформи туманного шару можна представити сукупністю таких основних модулів:

- мережних модулів апаратної платформи, призначених для підтримання надійного з'єднання з використанням провідних та безпроводних технологій;

- апаратних прискорювачів, які інтегруються у платформу та призначені для підвищення продуктивності виконання окремих операцій;

- обчислювальних компонентів, що формують необхідний для функціонування туманного вузла обсяг обчислювальних ресурсів;

- модулів пам'яті, які забезпечують зберігання даних і є невід'ємною складовою обчислювальної платформи;

- засобів інформаційної безпеки забезпечення захисту даних та ресурсів туманного вузла;

- модулів керування, за допомогою яких здійснюється координація роботи складових апаратної платформи;

- засобів віртуалізації та контейнеризації, призначених для логічного розподілу апаратних ресурсів і створення середовищ виконання віртуальних машин або контейнерів для розгортання туманних сервісів.

Під час формування архітектури туманного шару необхідно враховувати характеристики конкретних класів систем Інтернету речей. Однією з актуальних тенденцій є залучення пристроїв з обмеженими обчислювальними та комунікаційними можливостями до виконання функцій туманних обчислювальних вузлів. Додатково ускладнює організацію таких систем зростання кількості мереж Інтернету речей з високою та надвисокою щільністю розміщення пристроїв. Такі мережі, як правило, мають розподілену просторову структуру, у зв'язку з чим виникає необхідність раціонального групування їх компонентів. Застосування кластеризації туманних пристроїв дає змогу підвищити ефективність використання доступних мережних та обчислювальних ресурсів системи Інтернету речей.

Окремим фактором, який необхідно враховувати при проектуванні перспективних мереж Інтернету речей, є просторове переміщення окремих пристроїв або цілих сегментів. Мобільність таких компонентів передбачає зміну їхнього положення у просторі протягом функціонування системи. Одним із напрямів розвитку туманних обчислень є

розміщення туманних вузлів на мобільних платформах, здатних змінювати своє просторове положення, відповідні рішення можуть передбачати використання безпілотних літальних апаратів як кінцевих пристроїв Інтернету речей або як мобільних вузлів, що входять до складу туманних кластерів.

Таким чином, дослідження туманних обчислень з урахуванням мобільності Fog-пристроїв є окремим актуальним напрямом. Функції Fog-пристроїв можуть виконувати різні елементи мережної інфраструктури: обладнання сегмента «останньої милі», користувацькі пристрої та безпосередньо пристрої Інтернету речей. Використання мобільних компонентів розширює можливості організації мережного слайсингу. При цьому об'єднання мобільних Fog-пристроїв у кластери може здійснюватися відповідно до певних характеристик, що визначають їх функціональну сумісність. Такими характеристиками можуть бути параметри переміщення пристроїв, зокрема швидкість і напрямок руху, а також часові характеристики виконання обчислювальних завдань на вузлах відповідного кластера. З урахуванням зазначених особливостей для побудови архітектури туманного шару Інтернету речей із надвисокою щільністю пристроїв та наявністю мобільних компонентів доцільно виділити чотири функціональні рівні:

- хмарний рівень, призначений для централізованого зберігання та оброблення даних IoT із використанням центрів обробки даних;

- рівень взаємодії з хмарною інфраструктурою, функції якого забезпечуються серверами, що формують ядро туманного шару та організують обмін даними між туманним і хмарним шарами;

- рівень туманних пристроїв, на якому вузли об'єднуються у функціональні кластери та взаємодіють із серверами ядра туманного шару;

- рівень кінцевих пристроїв Інтернету речей, що охоплює сенсори, камери, мобільні та інші пристрої, які безпосередньо отримують інформацію від фізичних об'єктів і процесів.

Також слід враховувати, що ефективність функціонування системи IoT з високою щільністю суттєво залежить від якості проведеної кластеризації. Розбиття туманних пристроїв на кластери впливає на показники QoS, особливо при виконанні транзакцій, для яких основними є часові критерії. В свою чергу, час обробки транзакції IoT для статичних кластерів в основному залежить від характеристик внутрішньо-кластерних каналів зв'язку. Але для мобільних кластерів на перше місце виходять стійкісні показники кластерної структури, для дослідження яких треба розробити відповідну модель.

3. 2 Математична модель функціонування мобільного кластеру туманного шару

Розміщення пристроїв туманного шару мережі підтримки Інтернету речей з високою щільністю характеризується обмеженим об'ємом. При цьому туманні пристрої розміщуються на відносно невеликій відстані один від одного. Величину такої відстані, наприклад, можна визначити дальністю

зв'язку, яка забезпечується стандартом мережі доступу. Крім того, на структуру мережі суттєво впливає взаємне розташування туманних пристроїв. Також треба враховувати мобільність туманних пристроїв, внаслідок чого архітектура та взаємне розташування пристроїв можуть змінюватися. Крім того, вихід мобільного пристрою туманному шару із зони зв'язку, призводить до часткового руйнування структури туману, тобто до незапланованих затримок у обробці інформації, що надходить з датчиків IoT, та зниження показників QoS.

В більшості випадків для динамічних туманних обчислень, що базуються на мобільних пристроях Інтернету речей, оперують групами пристроїв – роями. У роях пристрої прагнуть зберегти загальні параметри руху. Наприклад, параметри руху автомобілів визначаються прийнятими правилами та особливостями дороги. При формуванні динамічних туманних кластерів в системах Інтернету речей великої щільності обираємо групи рухливих щільно розміщених пристроїв. Такі пристрої намагаються зберегти своє положення щодо інших членів групи.

Для описи взаємного положення елементів мережі динамічних туманних обчислень підтримки Інтернету речей пропонується використовувати модель точкового процесу Томаса. Для цього розглянемо розташування групи мобільних пристроїв IoT у тривимірному просторі на початку руху. Нехай окремі елементи групи мобільних пристроїв IoT $e_1, \dots, e_k, \dots$ входять до кластера K_j та розташовані в поточних позиціях. Ці позиції задані правилами організації для пристроїв IoT та на даний момент фіксовані щодо центру даного кластера, позначеного на схемі як C_j . Усі елементи кластера разом можуть переміщатися з рівними швидкостями в одному і тому ж напрямку. Отже, відстань між пристроєм IoT і центром кластера K_j в тривимірному просторі можна визначати за таким виразом:

$$d_{ji0} = \sqrt{(x_{ji} - x_{jc})^2 + (y_{ji} - y_{jc})^2 + (z_{ji} - z_{jc})^2}, \quad (4)$$

де $x_{ji}, x_{jc}, y_{ji}, y_{jc}, z_{ji}, z_{jc}$ – поточні координати пристроїв IoT та координатора кластера K_j – точки C_j .

При цьому, якщо центр кластера C_j прийняти за початок координат, то елементи кластера будуть відносно нерухомими щодо його центру.

Але в процесі реального руху швидкості і напрямки руху окремих мобільних елементів можуть дещо відрізнитися. Це призводить до їх відхилення від заданих позицій в кластері. Отже, координати x_{ji}, y_{ji}, z_{ji} , є випадковими величинами. Зауважимо, що мобільні пристрої IoT у більшості випадків зберігають власне становище щодо інших членів групи. Зробимо припущення, що випадкові координати динамічних пристроїв IoT мають нормальний розподіл. Нехай у системі координат кластера K_j початкове положення i -го пристрою – точка $A_{ji0}(x_{ji0}, y_{ji0}, z_{ji0})$, а поточне положення – точка $A_{ji}(x_{ji}, y_{ji}, z_{ji})$. Тоді відхилення пристрою від початкового положення розраховується як:

$$\xi_{ji} = \sqrt{(x_{ji} - x_{ji0})^2 + (y_{ji} - y_{ji0})^2 + (z_{ji} - z_{ji0})^2}. \quad (5)$$

Зауважимо, що величина ξ_{ji} не залежить від вибору систем координат, тобто $\xi_{ji} = \xi_i \forall i$. Відхилення ξ_i є випадковою величиною, розподіленою за нормальним законом із такою функцією щільності ймовірності:

$$f(\xi_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}(\xi_i / \sigma_i)^2\right), \quad (6)$$

де σ_i – середньоквадратичне відхилення випадкової величини ξ_i від початкового положення пристрою i .

Розглянемо пристрій IoT e_i , який належить кластеру K_j з радіусом зони досяжності R_j , а d_{ji0} – це відстань між початковим положенням e_i та центром кластера K_j . В процесі руху пристрій e_i практично може відхилитися від початкового положення не більше, ніж на $3\sigma_i$. Отже всі поточні положення пристрою повинні знаходитися у сфері радіусом R_j з центром у початковому положенні. Вихід будь-якого мобільного пристрою за межі даної сфери призведе до руйнування структури кластера K_j .

Розрахуємо ймовірність того, що пристрій IoT e_i буде знаходитися у зоні досяжності кластера K_j :

$$P_{ji}^+ \rightarrow P_{ji}^{(theor+)} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 3\sigma_i + d_{ji0} \leq R_j; \\ 0.5 + \Phi(3\sigma_i + d_{ji0} - R_j), & \text{інакше,} \end{cases} \quad (7)$$

де $\Phi(\xi_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\xi_i} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ – значення функції

Лапласа для розподілу (8).

Тоді ймовірність того, що структура кластера K_j буде зруйнована, тобто хоча б один із пристроїв вийде за межі зони досяжності координатора є такою:

$$P_j^- = 1 - \sum_{i=1}^{k_j} P_{ji}^+, \quad (8)$$

де k_j – кількість елементів кластера K_j .

В якості критерію формування мобільного кластера приймемо максимальну стійкість кластера туманних обчислень. Під стійкістю кластера будемо розуміти ймовірність збереження його структури, тобто ймовірність наявності зв'язку між центральним пристроєм та всіма елементами кластера. Тоді цільовою функцією при формуванні кластерної структури буде такий вираз:

$$\max_j \left(\min_{pos(C_j)} \left(1 - \sum_{i=1}^{k_j} P_{ji}^+ \right) \right),$$

$$pos(C_j) \in D, \quad k_j \in \overline{1, n}, \quad (9)$$

де D – зона обслуговування IoT; $pos(C_j)$ – позиція центру кластера K_j в тривимірному просторі; n – розмір групи мобільних пристроїв системи IoT, що кластеризується.

3. 3 Розробка та дослідження ефективності алгоритму забезпечення стійкості мобільного кластера туманного шару

Стійкість кластера, що складається із мобільних пристроїв IoT, забезпечується за рахунок збереження його структури. При розгортанні туманних обчислень на базі наземних мобільних систем головним координуючим пристроєм може бути мережний пристрій повітряного сегменту IoT. Він повинен мати таку позицію в кластері, яка максимально забезпечувала б стійкість кластера при русі групи мобільних пристроїв, треба мінімізувати ймовірність виходу будь-якого пристрою із кластера при випадкових переміщеннях пристроїв IoT.

При кластеризації пристроїв туманного шару Інтернету речей з високою і надвисокою щільністю зазвичай використовуються центроїдні алгоритми кластеризації. Дані алгоритми мінімізують сумарну відстань від туманних пристроїв до центрів кластерів відповідно з виразом (1). Для кластеризації групи мобільних пристроїв D був обраний центроїдний алгоритм FOREL, який надає можливість варіювати параметрами кластерів та їх центрів. Алгоритм FOREL базується на принципі формування кластерів у місцях згущення об'єктів IoT. Згідно з даним алгоритмом та виразом (1) для групи D при кластеризації мінімізується функціонал Θ :

$$\Theta \rightarrow \min; \quad \Theta = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{k_j} d_{ji0},$$

$$pos(C_j) \in D, \quad k_j \in \overline{1, n}, \quad j \in \overline{1, m}, \quad (10)$$

де m – кількість кластерів у групі пристроїв IoT, отриманих після виконання алгоритму FOREL.

Зауважимо, що стійкість мобільного кластера збільшується при наближенні центру мобільного туманного пристрою до центру кластера. Тому бажано центр кластера змістити ближче до скупчення пристроїв. Це можна зробити за рахунок введення вагових коефіцієнтів, які впливають на позицію центру кластера. Якщо ваговий коефіцієнт якогось елемента набагато більший ніж вагові коефіцієнти інших елементів, то центр кластера буде зміщуватися до цього елемента. Введемо вагові коефіцієнти у формулу (2), за якою розраховуються координати центра мас кластера:

$$C_j = (x_{jc}, y_{jc}, z_{jc}); \quad x_{jc} = \frac{1}{k_j} \sum_{i=1}^{k_j} \gamma_i x_{ji0};$$

$$y_{jc} = \frac{1}{k_j} \sum_{i=1}^{k_j} \gamma_i y_{ji0}; \quad z_{jc} = \frac{1}{k_j} \sum_{i=1}^{k_j} \gamma_i z_{ji0}, \quad (11)$$

де γ_i – ваговий коефіцієнт мобільного пристрою e_i .

Врахуємо критерій стійкості кластера за допомогою вагового коефіцієнта мобільного пристрою IoT e_i :

$$w_i = \sigma_i^s, \quad 0 \leq s \leq 1, \quad (12)$$

де s – коефіцієнт, що визначає чутливість методу до випадкових відхилень елементів кластеру від початкової позиції.

Вибір значення коефіцієнта визначається значимістю критерію стійкості кластера для завдання. При $s=0$ стійкість кластера як критерій не враховується. При $s=1$ критерій стійкості кластера максимально впливає на формування кластерів.

Також модифікується третій крок алгоритму FOREL. На цьому кроці до поточного кластеру відбираються тільки ті мобільні об'єкти IoT, для яких виконана умова $P_{ji}^{(theor+)} = 1$. Це робить ймовірність

виходу будь-якого мобільного об'єкту із кластера мінімальною. Звісно, кількість кластерів може збільшитися, але стійкість отриманих кластерів суттєво підвищиться.

Зауважимо, що для завдання кластеризації із застосуванням модифікованого алгоритму FOREL потрібні додаткові вхідні дані:

– початкові координати елементів групи мобільних пристроїв IoT, що є математичними сподіваннями координат елементів;

– середньоквадратичні відхилення положень мобільних пристроїв IoT.

Такі дані можна отримати в результаті збору відповідної статистики у перебігу достатнього часового інтервалу.

Для оцінки ефективності модифікованого методу була використана імітаційна модель. Елементи групи мобільних пристроїв у моделі утворювали гетерогенні скупчення, тобто різні за складом та характером розміщення. Координати мобільних пристроїв розглядалися як значення випадкових величин, розподілених за нормальним законом. Параметри відповідних нормальних розподілів для кожного елемента e_i задавалися нульовим математичним сподіванням $\mu_i=0$ і середньоквадратичним відхиленням (СКВ) σ_i . Розкид відхилень елементів від початкових позицій був різним для різних елементів. На СКВ накладено обмеження $R/60 < \sigma_i < R/12$, яке продиктовано особливостями мобільних пристроїв IoT.

Оцінювалась ефективність модифікованого методу у порівнянні з методом формування кластера, що базується тільки на критерії відстані між елементами. Оцінка проводилася за показником стійкості системи, розрахованим за виразом (6) та переведеним у відсотки. При моделюванні коефіцієнт s , що визначає чутливість методу до випадкових відхилень, змінювався дискретно з кроком 0,2. Були змодельовані різні варіанти розміру групи мобільних пристроїв: $n \in \{50, 150, 300\}$. Також у моделі використовувався показник середньостатистичної границі можливих відхилень мобільних пристроїв від запланованих траєкторій:

$$\sigma = 3 \sum_{i=1}^n \sigma_i / n. \quad (15)$$

Узагальнені результати моделювання наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати імітаційного моделювання (відсоток незруйнованих кластерів)

σ/R	n	m, s	m_0	$s=0$	$s=0.2$	$s=0.4$	$s=0.6$	$s=0.8$	$s=1.0$	m_1
0.05	50		4	0.4 %	0.4 %	0.3 %	0.3 %	0.3 %	0.2 %	4
	150		9	2.2 %	1.7 %	1.2 %	1.0 %	0.7 %	0.5 %	10
	300		14	3.4 %	2.7 %	2.1 %	1.7 %	1.3 %	1.0 %	19
0.10	50		4	3.6 %	2.8 %	2.1 %	1.6 %	1.1 %	0.5 %	6
	150		9	10.5 %	3.9 %	5.3 %	3.1 %	1.9 %	0.8 %	14
	300		15	21.7 %	2.9 %	7.0 %	5.3 %	2.8 %	1.3 %	37
0.25	50		4	27.6 %	14.1 %	7.9 %	6.8 %	2.7 %	0.9 %	11
	150		10	32.0 %	16.8 %	8.8 %	5.2 %	3.3 %	1.1 %	34
	300		16	44.5 %	29.9 %	11.8 %	9.1 %	7.0 %	1.9 %	87

У табл. 1 стовпець « $s=0$ » відповідає кластеризації, при якій відхилення мобільних елементів туманного шару не враховуються. Кількість отриманих кластерів при такій кластеризації наведена у стовпці « m_0 ». Стовпець « $s=1$ » відповідає кластеризації, яка максимальна орієнтована на стійкість мобільних кластерів. При цьому кількість отриманих кластерів наведена у стовпці « m_1 ». Результати моделювання показали, що ефективність запропонованого методу підвищується в таких випадках: зростання значень СКВ мобільних пристроїв від запланованих траєкторій руху; збільшення кількості мобільних туманних пристроїв. Це пояснюється тим, що алгоритм кластеризації обирає положення центру кластера, за рахунок наближення центру до найбільш нестійких елементів.

Але при відносно великих значеннях СКВ кількість кластерів у порівнянні із стандартним методом починає збільшуватися. Це ускладнює керування компонентами туманного шару.

4. Обговорення результатів дослідження методу адаптивної кластеризації

Розроблена архітектура мобільної компоненти туманного шару Інтернету речей високої або надвисокої щільності. Наявність окремих мобільних компонент є суттєвою відмінністю від існуючих архітектурних рішень побудови туманної інфраструктури. Запропонована модель окремого мобільного кластера туманного шару. Головна відмінність даної моделі – орієнтованість не тільки на просторові показники, але й на стійкісні характеристики кластера. Для реалізації моделі використана модель точкового процесу Томаса Дана модель дозволила розробити метод забезпечення стійкості мобільного кластера туманного шару. Доведена ефективність проведення кластеризації з використанням модифікованого центроїдного алгоритму FOREL. Даний алгоритм модифікований за рахунок введення вагових коефіцієнтів при знаходженні положення центру мобільного кластера, що надало можливість наблизити нестабільні компоненти до центру кластера.

Досліджена ефективність запропонованого метода забезпечення стійкості мобільного кластера туманного шару Інтернету речей високої або надвисокої щільності. Порівняльне тестування стандартного та модифікованого методів (табл. 1) показало такі результати: при зростанні значень СКВ

мобільних пристроїв від запланованих траєкторій руху стійкість мобільного кластера підвищується; при значенні відношення σ/R від 0.05 до 0.2 використання модифікованого методу дозволяє підвищити стійкість мобільної структури до 20 %; при $\sigma/R > 0.2$ використання модифікованого методу недоцільно внаслідок ускладнення керування компонентами туманного шару; при $\sigma/R < 0.05$ стійкість мобільної структури підвищується не більше, ніж на 5 %. Отримані результати дослідження метода забезпечення стійкості мобільного кластера можна пояснити наближенням центрів мобільних кластерів до нестійких компонент.

Як розвиток даного дослідження можна відзначити наступне. При підвищенні нестабільності групи мобільних пристроїв IoT деякі пристрої стають ізольованими, тобто не входять до сформованих кластерів, тобто треба проведення додаткового дослідження щодо ізольованих компонент у групі мобільних кластерів.

5. Висновки

Розроблений підхід до формування архітектури мобільної компоненти туманного шару Інтернету речей високої або надвисокої щільності. При розробці враховувались специфічні особливості мобільних пристроїв IoT, які використовуються в якості динамічних вузлів туманного шару. Це дозволило запропонувати трирівневу архітектуру туманної інфраструктури, в якій мобільні кластери є окремими компонентами.

Розроблена модель окремого мобільного кластера туманного шару, яка враховує випадковість руху мобільних пристроїв IoT та базується на точковому процесі Томаса. Головною відмінністю даної моделі від існуючих є орієнтованість не тільки на просторові показники, але й на стійкісні характеристики компонент кластера. Дана модель дозволила розробити метод забезпечення стійкості мобільного кластера туманного шару на базі запропонованої архітектури мобільної компоненти туманного шару Інтернету речей.

3. Розроблений та досліджений метод забезпечення стійкості мобільного кластера туманного шару підтримки Інтернету речей високої або надвисокої щільності. Підвищення стійкості досягається за рахунок ітеративного наближення центру кластера до найбільш нестійких його компонент. Порівняна стійкість мобільних кластерів, побудованих стандартним та модифікованим

методами. Якщо середнє відносне відхилення елементів кластера знаходиться в межах від 0.05 до 0.2, то стійкість підвищується до 20 %. Доведено, що при значенні середнього відносного відхилення більше 0.2, використання модифікованого методу недоцільно внаслідок ускладнення керування компонентами туманного шару.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи

іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Фінансування

Дослідження профінансовано Міністерством освіти та науки України в рамках дослідницького проекту 0125U001544 на тему “Методологія забезпечення процесів моніторингу та контролю виконання портфелів проектів та програм для проектних офісів в умовах відбудови України”.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hu, N. (2024). Internet of things edge data mining technology based on cloud computing model. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 20(6), 1749–1763. <http://dx.doi.org/10.24507/ijicic.20.06.1749>
2. Hunko, M., Tkachov, V., Kovalenko, A., Kuchuk, H. (2023). Advantages of Fog Computing: A Comparative Analysis with Cloud Computing for Enhanced Edge Computing Capabilities. *KhPI Week 2023 - Conference Proceedings*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312948>
3. Kuchuk, H., Malokhvii, E. (2024). Integration of iot with Cloud, Fog and Edge computing: a review. *Advanced Information Systems*. 8(2), 65–78. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.08>
4. Fatlawi, A., Al Dujaili, M.J. (2023). Integrating the Internet of Things (IoT) and Cloud Computing Challenges and Solutions: A Review. *AIP Conference Proceedings*, 2977(1), 020067. <http://dx.doi.org/10.1063/5.0181842>
5. Singh, C., Khilari, S., Taware, R. (2024). Active Machine-to-Machine (M2M) and IoT Communication Architecture for Mobile Devices and Sensor Nodes. *Lecture Notes in Networks and Systems*, pp. 25–38. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5786-2_3
6. Kuchuk, N., Kovalenko, A., Ruban, I., Shyshatskyi, A., Zakovorotnyi, O., Sheviakov, I. (2023). Traffic Modeling for the Industrial Internet of NanoThings. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2023 - Conference Proc., 194480. <http://dx.doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312856>
7. Alsadie, D. (2024). Advancements in heuristic task scheduling for IoT applications in fog-cloud computing: challenges and prospects. *PeerJ Computer Science*, 10, e2128. <https://doi.org/10.7717/PEERJ-CS.2128>
8. Sobchuk, V., Pykhivskyi, R., Barabash, O., Korotin, S., Omarov, S. (2024). Sequential intrusion detection system for zero-trust cyber defense of IoT/IIoT networks. *Advanced Information Systems*, 8(3), 92–99. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.11>
9. Saurabh, Dhanaraj, R.K. (2024). Enhance QoS with fog computing based on sigmoid NN clustering and entropy-based scheduling. *Multimed Tools Appl*, 83, 305–326. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15685-3>
10. Kuchuk, H., Mozhaiev, O., Kuchuk, N., Tiulieniev, S., Mozhaiev, M., Gnusov, Y., Tsuranov, M., Bykova, T., Klivets, S., Kuleshov, A. (2024). Devising a method for the virtual clustering of the Internet of Things edge environment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(9)(127), 60–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298431>
11. Sharma, Sh. Saini H. (2019). A novel four-tier architecture for delay aware scheduling and load balancing in fog environment. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2019.100355>
12. Li, G., Liu, Y., Wu, J., Lin, D., Zhao, Sh. (2019). Methods of Resource Scheduling Based on Optimized Fuzzy Clustering in Fog Computing. *Sensors*, 19(9). <https://doi.org/10.3390/s19092122>
13. Jamil, B. Shojafar, M., Ahmed, I., Ullah, A., Munir, K., Ijaz, H. (2020). A job scheduling algorithm for delay and performance optimization in fog computing. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 32(7). <https://doi.org/10.1002/cpe.5581>
14. Ding, H., Ding, X., Xia, F., Zhou, F. (2023). An Efficient Method for Implementing Applications of Smart Devices Based on Mobile Fog Processing in a Secure Environment. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 14(10), 93–105. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0141011>
15. Qayyum, T., Trabelsi, Z., Waqar Malik, A., Hayawi, K. (2022). Mobility-aware hierarchical fog computing framework for Industrial Internet of Things. *Journal of Cloud Computing*, 11(1), 72. <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00345-y>
16. Routray, K., Bera, P. (2024). Fog-Assisted Dynamic IoT Device Access Management Using Attribute-Based Encryption. *ACM International Conference Proceeding Series*, 346–352. <https://doi.org/10.1145/3631461.3631466>
17. Kuchuk, H., Kalinin, Y., Dotsenko, N., Chumachenko, I., Pakhomov, Y. (2024). Decomposition of integrated high-density IoT data flow. *Advanced Information Systems*, 8(3), 77–84. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.09>
18. Proietti Mattia, G., Beraldi, R. (2023). P2PFaaS: A framework for FaaS peer-to-peer scheduling and load balancing in Fog and Edge computing. *SoftwareX*, 21, 101290. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711022002084>
19. Lu, S., Wu, J., Wang, N., Duan, Y., Liu, H., Zhang, J., Fang, J. (2023). Resource provisioning in collaborative fog computing for multiple delay-sensitive users. *Software – Practice and Experience*, 53(2), 243–262. <https://doi.org/10.1002/spe.3000>
20. Pardo, C., Wei, R., Ivens, B.S. (2022). Integrating the business networks and internet of things perspectives: A system of systems (SoS) approach for industrial markets. *Industrial Marketing Management*, 104, 258–275. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2022.04.012>
21. Drabech, Z., Douimi, M., Zemmouri, E. (2024). A Markov random field model for change points detection. *Journal of Computational Science*, 83, 102429. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2024.102429>

22. Zhu, Q., Hu, L., Wang, R. (2022). Image Clustering Algorithm Based on Predefined Evenly-Distributed Class Centroids and Composite Cosine Distance. *Entropy*, 24(11), 1533. <https://doi.org/10.3390/e24111533>
23. Mutambik, I. (2024). An Entropy-Based Clustering Algorithm for Real-Time High-Dimensional IoT Data Streams. *Sensors*, 24(22), 7412. <https://doi.org/10.3390/s24227412>
24. Petrovska, I., Kuchuk, N., Pochebut, M., Kuchuk, H., Mozhaiev, O., Onishchenko Y. (2023). Sequential Series-Based Prediction Model in Adaptive Cloud Resource Allocation for Data Processing and Security. The 13th IEEE Int. Conf. on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT'2023, Athens, Greece, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416496>
25. Filosi, M., Visintainer, R., Riccadonna, S., Jurman, G., Furlanello, C. (2014). Stability indicators in network reconstruction. *PLoS ONE*, 9(2), e89815. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089815>
26. Petrovska I., Kuchuk, H. Mozhaiev M. (2022). Features of the distribution of computing resources in cloud systems. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2022 - Conference Proceedings, 03-07 October 2022. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916459>
27. Kuchuk, N., Kashkevich, S., Radchenko, V., Andrusenko, Y., Kuchuk, H. (2024). Applying edge computing in the execution IoT operative transactions. *Advanced Information Systems*, 8(4), 49–59. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.07>
28. Thomas, P., Jose, D.V. (2023). Towards Computation Offloading Approaches in IoT-Fog-Cloud Environment: Survey on Concepts, Architectures, Tools and Methodologies. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 613 LNNS, 37–52. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9379-4_4
29. Mani Kiran, C.V.N.S., Jagadeesh Babu, B., Singh, M.K. (2023). Study of Different Types of Smart Sensors for IoT Application Sensors. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 290, 101–107. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0108-9_11
30. Emami Khansari, M., Sharifian, S. (2024). A scalable modified deep reinforcement learning algorithm for serverless IoT microservice composition infrastructure in fog layer. *Future Generation Computer Systems*, 153, 206–221. <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.11.022>

Received (Надійшла) 14.06.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.09.2026

Publication date (Дата публікації) 25.09.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Коваленко Андрій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Andriy Kovalenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: andriy.kovalenko@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2817-9036>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56423229200>.

Кучук Георгій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Heorhii Kuchuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: kuchuk56@ukr.net; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-2862-438X>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57057781300>.

A Method for Adaptive Clustering of Mobile Nodes in the Fog Layer of the Internet of Things

Andriy Kovalenko, Heorhii Kuchuk

Abstract. Relevance. The primary criterion for clustering fog devices is the proximity of the fog nodes belonging to a cluster. However, when mobile nodes are present, the cluster structure may be disrupted if a mobile node moves beyond the cluster boundaries. This may result in unexpected delays in IoT data processing. Therefore, for such systems, an additional criterion related to the stability of the cluster structure should be considered. **The subject of the study** is clustering methods for high-density fog-layer Internet of Things networks. **The aim of the study** is to improve the stability of mobile components of the fog layer by modifying the clustering approach through the development of a method for forming a stable mobile cluster. **The objectives of the study** are to develop an approach to the architecture of the mobile component, as well as a model and a method for ensuring the stability of a mobile cluster in a high-density fog-layer Internet of Things network. **Research results.** To organize the interaction of mobile devices, an architecture of the mobile component of the fog layer has been developed, taking into account its decentralized structure and the specific operational characteristics of mobile Internet of Things devices. The proposed architecture consists of four levels and provides for the formation of separate mobile clusters of fog devices at the lower level. To investigate the formation of mobile clusters, a corresponding model has been developed that accounts for the random nature of the movement of Internet of Things devices. The spatial distribution of mobile components is modeled using the Thomas point process. Based on the proposed model, the FOREL clustering algorithm has been modified. In the modified algorithm, the position of the cluster center is determined using weighting coefficients that characterize the stability of its components. **Conclusions.** Simulation results demonstrated increased stability of the formed mobile clusters in environments with high and ultra-high device density. It was found that an increase in the mean relative deviation of the actual device trajectories from their planned trajectories leads to an increase in the stability of the cluster structure. This behavior is explained by the displacement of the cluster center toward its least stable components, which enables the cluster structure to adapt to changes in the spatial distribution of mobile devices. The proposed method can be used for clustering mobile components of the fog layer of the Internet of Things when the mean deviation of device movement from the specified trajectories does not exceed 20% of the cluster radius.

Keywords: mobile device; Internet of Things; clustering; fog layer; Thomas point process.