

Ю. В. Климаш, О. М. Шпур, М. В. Кайдан
Національний університет “Львівська політехніка”

КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У САМООРГАНІЗОВАНИХ МЕРЕЖАХ

© *Климаш Ю. В., Шпур О. М., Кайдан М. В., 2017*

Розроблено комплексний підхід до оптимізації маршрутів передавання даних у самоорганізованих мережах. Суть методу полягає у оптимізації множини найкращих маршрутів, що утворюються завдяки роботі модифікованих алгоритмів імітації відпалу та мурашкового, використання яких дає змогу знаходити глобальний екстремум деякої функції на основі впорядкованого випадкового пошуку та здійснювати пошук оптимізованого маршруту з найкращим значенням параметра QoS на основі видалення/додавання вузла до маршруту, а також враховувати неоднорідності в мережі. Це дасть змогу забезпечити високу працездатність мережі загалом та підтримувати необхідний рівень параметрів QoS для кінцевих користувачів.

Ключові слова: самоорганізовані мережі, мурашковий алгоритм, генетичний алгоритм, метод імітації відпалу, QoS.

Yu. V. Klymash, O. M. Shpur, M. V. Kaidan
Lviv Polytechnic National University

COMPLEX OPTIMIZATION METHOD OF ROUTING INFORMATION FLOWS IN SELF-ORGANIZED NETWORKS

© *Klymash Yu. V., Shpur O. M., Kaidan M. V., 2017*

Modified routing algorithms are presented based on basic meta-heuristic algorithms: ant colony optimization, genetic and simulated annealing to determine the best route for information flows in self-organized networks. An ant colony optimization is based on the use of the probability parameter for the transition between the nodes located between the source node and the receiving node. To solve the problem of optimization of routing in a simulated annealing, its modification is proposed by adding or removing a transit node based on the coverage of the reaching range of neighboring nodes. As a target function for estimating a route, the QoS parameter is considered – the time of data delivery from the source node to the receiving node. For the first time, a routing algorithm is proposed based on a combination of proposed modified algorithms, where, from a set of best routes, formed by a modified annealing simulation algorithm, the choice of the best route according to the criterion of the time of data transmission is made by using a modified ant algorithm. For simulation an algorithm for generating traffic of a self-organized network is presented. The considered algorithms of routing allow to reduce the time of data transmission between the source node and the receiving node, which increases the efficiency of routing information flows in self-organized networks. It is shown that an important condition for efficient routing in self-organized networks is the reduction of the number of transit nodes between the source node and the node-coordinator.

Key words: self-organized networks, ant colony optimization, genetic algorithm, simulated annealing, QoS.

Вступ

Завдання оптимізації маршруту передавання даних є істотною складовою сучасних самоорганізованих мереж. Останніми роками інтенсивно розвивається науковий напрям “Природні обчислення”, в якому закладено принципи природних механізмів прийняття рішень [1, 2]. Генетичні алгоритми дають змогу здійснювати швидку генерацію розв’язків поставленої задачі, уникаючи повного перебору та значно зменшуючи часові витрати. За використання традиційних методів оптимізації та пошуку рішення навіть незначна зміна параметрів середовища передавання даних призводить до необхідності повторного виконання всіх обчислень. Робота генетичних алгоритмів основана на природній еволюції та техніці “виживає найпристосованіший”, за якої найкращі рішення виживають і змінюються до досягнення найкращого результату [3] – у нашому випадку найоптимальнішого маршруту передавання даних. Якщо змінюється топологія мережі, наприклад, через відмову вузла, у випадку використання класичних методів оптимізації необхідно розглядати мережу з новою топологією, тоді як за генетичного алгоритму деяка корисна інформація зберігається в пам’яті з минулого популяції (безлічі потенційних рішень) і її можна використовувати. Це дозволяє еволюційним методам маршрутизації адаптуватися до умов, що змінюються. Такий підхід дає змогу розробляти алгоритми маршрутизації, які продовжують працювати, навіть коли змінюється топологія мережі, внаслідок чого генетичні алгоритми можуть значно підвищити продуктивність функціонування самоорганізованих мереж [4, 5].

Мурашкові алгоритми являють собою імовірнісну жадібну евристику, в якій імовірності встановлюються на основі інформації про якість рішення, отриманого попередньо [6]. Вони можуть використовуватися як для статичних, так і для динамічних комбінаторних оптимізаційних задач. Оскільки в основу мурашиного алгоритму покладено моделювання пересування мурашок по деяких маршрутах, то такий підхід є ефективним способом пошуку раціональних рішень для задач оптимізації, що допускають графову інтерпретацію, зокрема для пошуку оптимального маршруту для самоорганізованих мереж. У роботі [7] автори пропонують модифікований мурашківий алгоритм для оптимальної маршрутизації, який відрізняється від класичного поліпшеною евристикою мурашки за рахунок введення поправки на кут. У [8] розглянуто дві модифікації мурашкового алгоритму: перша стосується введення принципу семафора, друга – встановлення швидкості випаровування феромонів залежно від часу передачі інформації по мережі.

Для багатьох оптимізаційних задач у галузі телекомунікаційних мереж використовується метод імітації відпалу, який, як і генетичний та мурашківий алгоритми, є метаевристичним [9]. Основною його перевагою є властивість уникнення “пастки” в локальних мінімумах оптимізованої функції та продовження пошуку глобального мінімуму. У [10] показано, що цей метод є одним з найефективніших для випадкового пошуку оптимального розв’язку широкого класу задач. У [11] запропоновано модифікацію методу імітації відпалу, яка дає змогу у випадку ймовірного переходу до гіршого рішення здійснювати перехід не до поточного сусіда, а до кращого з переглянутих сусідів, внаслідок чого такий метод може бути застосований до будь-якої оптимізаційної задачі. Проте, незважаючи на широку сферу застосування, швидкість збіжності методу імітації відпалу малодосліджена.

Оскільки характерною особливістю самоорганізованих мереж є динамічно змінна топологія, що формується на основі автономних вузлів, то важливим питанням для таких мереж є визначення найкращого маршруту передавання інформації, особливо в умовах, коли таких маршрутів декілька.

Генетичний алгоритм маршрутизації потоків

Один із підходів до забезпечення оптимізації маршруту передавання даних – використання генетичного алгоритму. Генетичні алгоритми аналізують популяцію хромосом, які становлять комбінацію елементів з певної множини, оптимізують цільову функцію, оцінюючи кожен хромосому.

Кожна хромосома являє собою маршрут, який оцінюють за допомогою цільової функції (фітнес-функції), що відображає “вартість” цього маршруту. Як таку функцію запропоновано використовувати параметр QoS – час доставки даних від вузла-джерела до вузла-отримувача (вузла-координатора).

На рис. 1 подано узагальнену блок-схему пропонованого генетичного алгоритму.

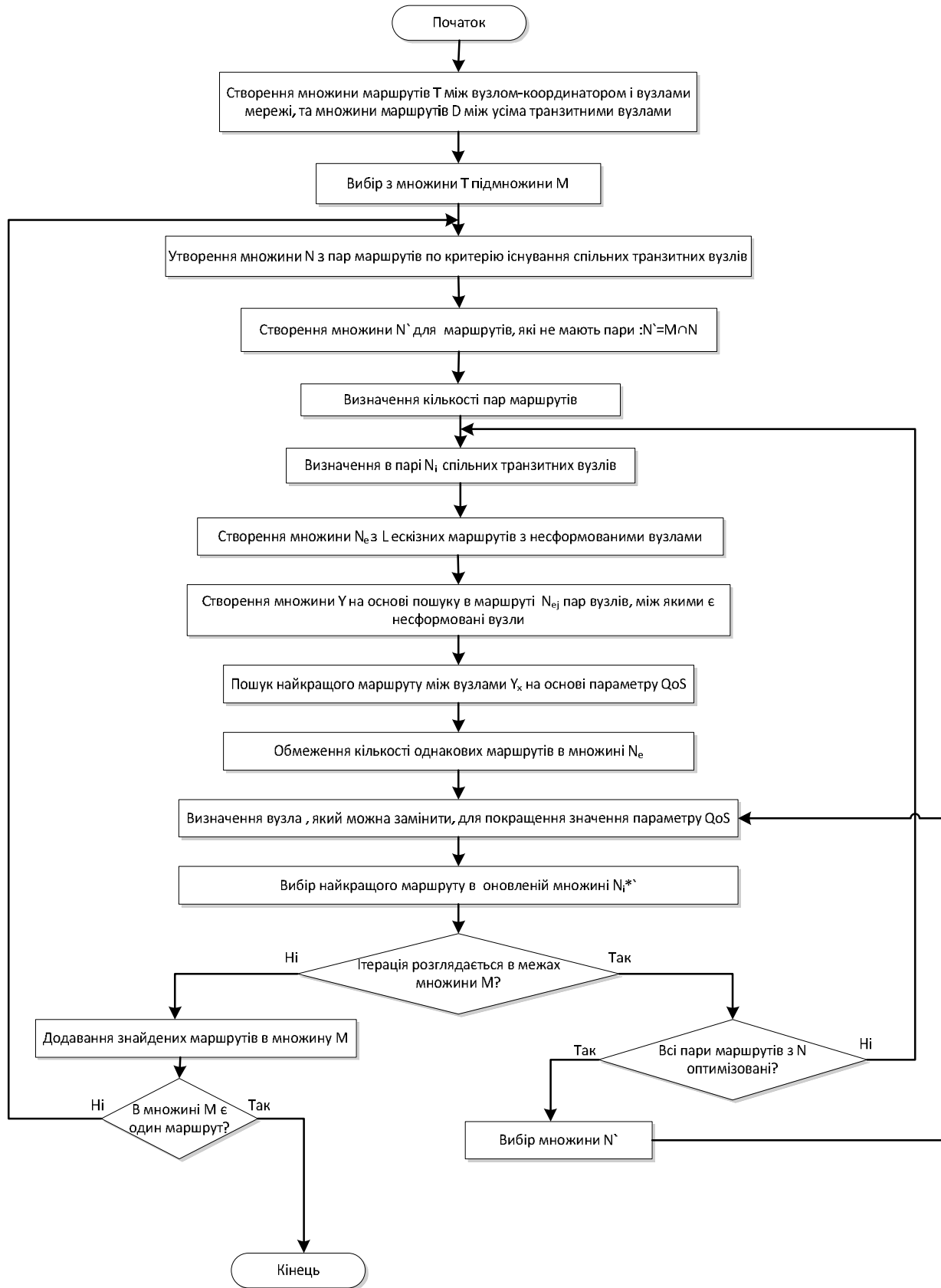


Рис. 1. Узагальнена блок-схема пропонованого генетичного алгоритму

Послідовність дій для наведеного алгоритму така:

1. Створюємо множину маршрутів між вузлом-координатором і вузлами мережі – T та множину маршрутів між усіма транзитними вузлами – R .

2. Для пошуку найкращого маршруту за цим алгоритмом з множини T вибираємо множину M (M є підмножиною множини T). Передумовою для здійснення такого вибору є розбиття множини T на підмножини T_i . Кожна з цих підмножин має однакову кількість транзитних вузлів.

Далі вибір здійснюється за трьома критеріями:

1. Вибираємо з множини T маршрути, які містять всі елементи R .

2. Вибираємо з множини T маршрути, які містять всі елементи R ; необхідною умовою є те, щоб в утвореній множині M був хоча б один маршрут кожної підмножини T_i .

3. З кожної підмножини T_i вибираємо маршрути, які містять всі елементи R , що входять в підмножину T_i , причому кількість маршрутів з T_i має бути не меншою від двох.

3. З множини M утворюємо пари маршрутів за критерієм існування спільних транзитних вузлів, внаслідок чого утворюється множина N – множина вибраних пар маршрутів. Для таких маршрутів має бути спільним як мінімум один транзитний вузол.

4. Створюємо множину N' для маршрутів, які не мають пари: $N' = M \cap N$.

5. Визначаємо кількість пар маршрутів – K .

6. Довільно вибираємо певну пару маршрутів N_i та визначаємо для неї спільні транзитні вузли.

7. Створюємо множину N_e з L ескізними маршрутами з несформованими вузлами.

Ескізним маршрутом вважатимемо маршрут, в якому наявні несформовані вузли.

Під несформованими вузлами розумітимемо вузли, які можна замінити для оптимізації маршруту.

Для прикладу розглянемо два маршрути A і B , які мають однакові вузол-джерело і вузол-отримувач. На основі цієї пари маршрутів утворюються ескізи маршрути:

- A_1 – маршрут на основі маршруту A ; спільні транзитні вузли замінюються несформованими вузлами, а інші – залишаються без змін.

- A_2 – маршрут на основі маршруту A ; спільні транзитні вузли залишаються без змін, а інші – замінюються несформованими вузлами.

- B_1 – маршрут на основі маршруту B ; спільні транзитні вузли замінюються несформованими вузлами, а інші – залишаються без змін.

- B_2 – маршрут на основі маршруту B ; спільні транзитні вузли залишаються без змін, а інші – замінюються несформованими вузлами.

8. Здійснюємо пошук у маршруті N_{ej} пари вузлів, між якими є несформовані вузли, внаслідок чого утворюється множина Y – множина вузлів, між якими є несформовані вузли.

9. Здійснюємо пошук найкращого маршруту між вузлами Y_x , де x – номер пари в ескізному маршруті, з множини D на основі значення параметра QoS.

10. Здійснюємо пошук однакових маршрутів у множині N_e^* – множина маршрутів N_{ej}^* . За наявності двох або більше однакових маршрутів зменшуємо їх кількість до одного. Після цього визначаємо кількість маршрутів – L' у множині N^* , яка є оновленою внаслідок видалення однакових маршрутів.

11. Визначаємо вузол, який можна замінити іншим, для покращення значення параметра QoS.

12. Здійснюємо вибір найкращого маршруту в оновленій множині N_i^* – множині маршрутів після мутації.

13. Перевіряємо, чи ітерація розглядається у межах множини M .

- 13.1. Якщо так, то переходимо до пункту 14.
- 13.2. Якщо ні, то переходимо до пункту 16.
14. Перевіряємо, чи всі пари маршрутів з N оптимізовані.
- 14.1. Якщо так, то переходимо до пункту 15.
- 14.2. Якщо ні, то переходимо до пункту 6.
15. Вибираємо N' і переходимо до пункту 11.
16. Здійснюємо додавання знайдених (ого) маршрутів (ту) в M .
17. Перевіряємо, чи в M є тільки один маршрут.
- 17.1. Якщо ні, то переходимо до пункту 3.
- 17.2. Якщо так, то переходимо до пункту 18.
18. Завершення роботи алгоритму. Алгоритм зупиняється, якщо популяція вироджується (передчасна збіжність), тобто немає розмаїтості в генах осіб популяції, або якщо закінчився ліміт часу чи знайдено рішення з найкращим значенням цільової функції.

Маршрутизація інформаційних потоків з використанням мурашкового алгоритму

Ідея мурашкового алгоритму ґрунтується на моделюванні поведінки колонії мурах, які здійснюють пошук шляху (маршруту) від мурашника до їжі за допомогою хімічної регуляції. Важливою властивістю мурашкових алгоритмів з погляду завдання маршрутизації є їх адаптивність – якщо який-небудь маршрут стає недоступним, то система здатна швидко знаходити відповідну заміну. Отже, такий алгоритм можна використовувати для знаходження найкоротшого маршруту між вузлом-джерелом і вузлом-отримувачем за наявності різних неоднорідностей мережі, переважань вузлів тощо. Розглянемо детальніше цей процес.

Мураха здійснює вибір маршруту на основі довжини шляху l_i , $i = \overline{1, n}$, де n – кількість маршрутів з поточного вузла-джерела, які залежать від кількості феромонів, що залишають на i -му маршруті інші мурахи. Досягнувши вузла призначення, мураха позначає маршрут свого руху феромонами, додаючи певну надбавку на його кожній ділянці: $\Delta t = \frac{Q}{L}$, де Q –, L – довжина пройденого шляху. При цьому на інших маршрутах здійснюється випаровування феромонів: $t_i(t) = g_i(t-1) + \Delta t$, де t – дискретний час (номер ітерації), $g \in [0;1]$ – параметр, значення якого впливає на швидкість випаровування феромонів (коефіцієнт оновлення): якщо $g = 0$, відбувається повне його випаровування, якщо $g = 1$, зберігається його значення. Очевидно, що маршрути, які найчастіше використовуються, тобто найоптимальніші (зокрема розглядаємо найкоротші), містять найбільшу кількість феромонів.

Отже, для кожної мурахи визначається ймовірність переходу між вузлами, які з'єднує ребро i :

$$p_i = \frac{(t_i)^a (h_i)^b}{\sum_{j=1}^n (t_j)^a (h_j)^b}, \quad (1)$$

де h_i – привабливість ребра i ; a – параметр, який контролює вплив t_i ; b – параметр, який контролює вплив h .

На основі вищесказаного запропоновано модифікований мурашковий алгоритм, блок-схему якого подано на рис. 2.

Розглянемо використання пропонованого мурашкового алгоритму для знаходження найкращого маршруту передавання даних у самоорганізованих мережах.

1. Приймаємо, що ймовірність переходу найкращого маршруту від вузла-джерела (i) до вузла-координатора (j) є $P^* = 0$. Оскільки маршрут на цьому етапі алгоритму невідомий, то $P^* = 0$, очевидно, що для будь-якого наявного маршруту ймовірність переходу більша від 0.

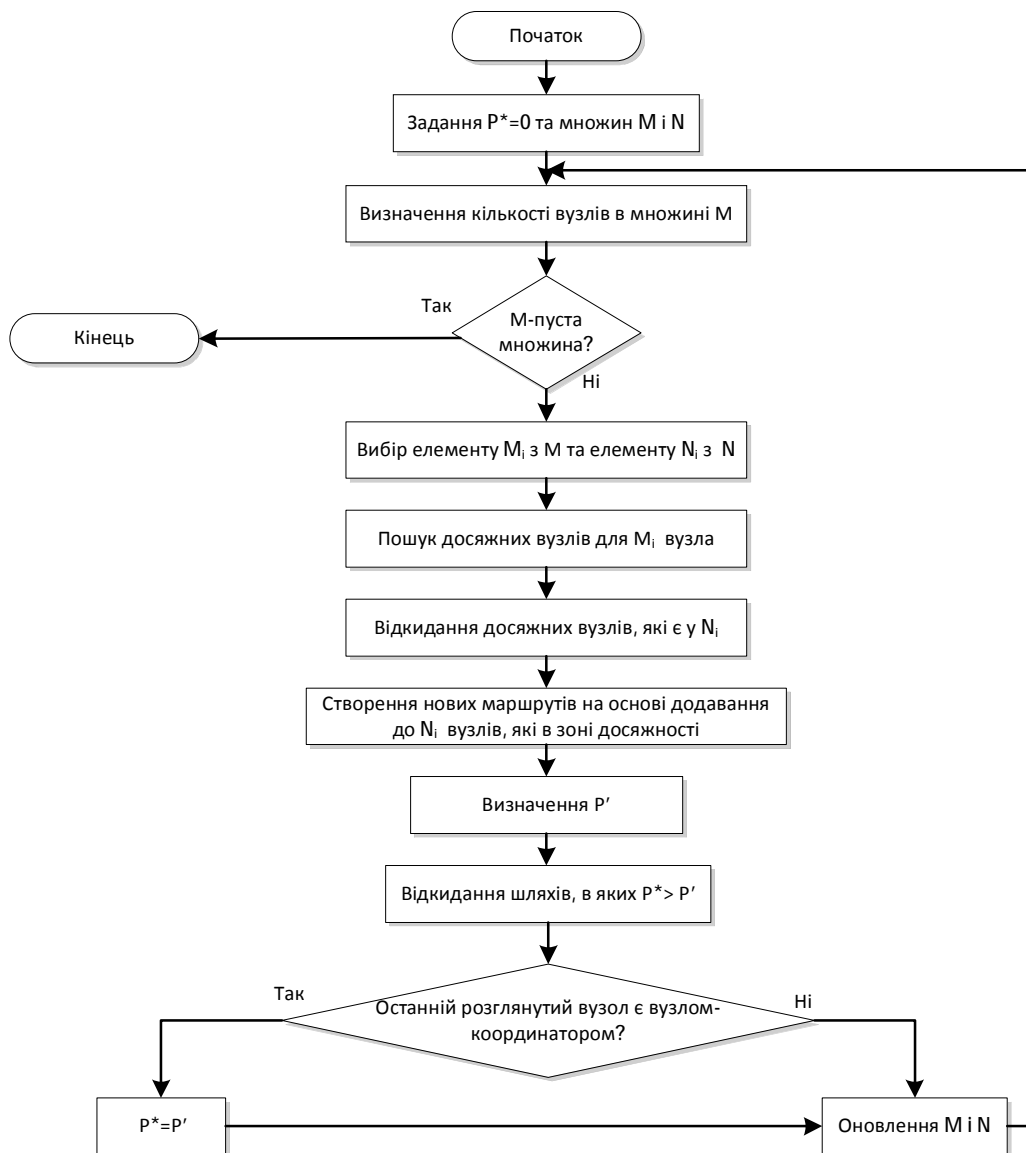


Рис. 2. Узагальнена блок-схема запропонованого мурашикового алгоритму

Вводимо множини M і N , які на цьому етапі містять лише вузол-джерело. Надалі під час виконання ітерацій алгоритму множина M складатиметься з транзитних вузлів, N – з маршрутів від вузла-джерела до вузлів множини M .

2. Визначаємо кількість вузлів у M .

3. Перевіряємо, чи M є пустою множиною.

3.1. Якщо так, то переходимо до пункту 14.

3.2. Якщо ні, то переходимо до пункту 4.

4. Здійснюємо вибір елемента M_i з M та елемента N_i з N .

5. Виконуємо пошук досяжних вузлів для M_i .

6. Для уникнення петель відкидаємо ті вузли, які містяться у N_i .

7. Створюємо нові маршрути на основі додавання до N_i вузлів, які є у зоні досяжності.

8. Визначаємо P^{\wedge} – ймовірність вибору маршруту від вузла-джерела до $M_i(y)$, де y – елемент множини досяжних вузлів.

9. На основі порівняння P^{\wedge} і P^* виконується відкидання вузлів, в яких $P^* \neq P^{\wedge}$.

10. Перевіряємо, чи останній розглянутий вузол є вузлом-координатором.

- 10.1. Якщо так, то переходимо до пункту 11.
- 10.2. Якщо ні, то переходимо до пункту 12.
11. Присвоюємо значення P до P^* . Отже, маршрут є найкращим на цей момент.
12. Оновлюємо множини M і N .
13. Переходимо до пункту 2.
14. Завершення роботи алгоритму.

Оптимізація маршрутів передавання даних на основі методу імітації відпалу

З розвитком комп'ютерних технологій класичні методи вирішення завдань маршрутизації почали поступатися метаевристичним. Одним з методів, що дає змогу знайти оптимальні рішення, є метод імітації відпалу. Цей метод знаходить глобальний екстремум деякої функції на основі впорядкованого випадкового пошуку. Метод імітації відпалу використовується для розв'язання задач глобальної оптимізації. За допомогою моделювання такого процесу шукають точку або множину точок, на яких досягається мінімум певної числової функції.

Метод імітації відпалу будує послідовність маршрутів оптимізаційної задачі, починаючи з початкового маршруту x_0 на t -ій ітерації (ітерації нумеруються з нуля), переходячи від маршруту x_t до x_{t+1} . На кожній з ітерацій згідно з [11] метод діє так. Спочатку для маршруту x_t формується так звана околиця $N(x_t)$ – дискретна випадкова величина, що задає безліч “сусідніх” до x_t маршрутів і для кожного з них ймовірність його вибору. На основі ймовірностей вибору з околиці вибирається маршрут x_{new} . Прийmemo, що $f(x)$ – вартість маршруту x . Якщо $f(x_{new}) < f(x_t)$, то як x_{t+1} вибирають маршрут x_{new} . Інакше $x_t + 1$ задають за правилом:

$$x_{t+1} = \begin{cases} x_{new}, & p_t, \\ x_t, & 1 - p_t, \end{cases}$$

де p_t – ймовірність переходу до гіршого рішення на t -ій ітерації. Побудова послідовності маршрутів завершується після виконання T ітерацій. Вимогою до функції ймовірності p_t є її позитивність, якщо $f(x_{new}) \geq f(x_t)$ (інакше метод зупиниться в першому локальному мінімумі). Зазвичай вибирають функцію p_t , спадну зі зростанням $f(x_{new}) - f(x_t)$ зі збільшенням t (2). В роботі використовується функція

$$p_t = \exp(f(x_t) - f(x_{new})) / q_t \quad (2)$$

де послідовність q_t зменшується із збільшенням t . З усіх побудованих маршрутів вибирають маршрут з найменшою вартістю, який є результатом роботи алгоритму імітації відпалу.

Розглянемо запропонований алгоритм імітації відпалу для покращення маршрутизації інформаційних потоків у мережах (рис. 3).

1. Задаємо M – множину маршрутів, яка містить K маршрутів з використанням всіх елементів R – множини транзитних вузлів.

2. Вибираємо певний маршрут M_i з множини M .

3. Здійснюємо пошук оптимізованого маршруту з найкращим значенням параметра QoS на основі видалення вузла з маршруту M_i . Така оптимізація можлива за умови, що вузол для видалення міститься у спільній зоні досяжності вузлів, які розглядаються.

4. Здійснюємо пошук оптимізованого маршруту з кращим значенням параметра QoS на основі додавання вузла до наявного маршруту.

5. Перевіряємо, чи найкращий маршрут збігається з M_i .

5.1. Якщо так, то переходимо до пункту 8.

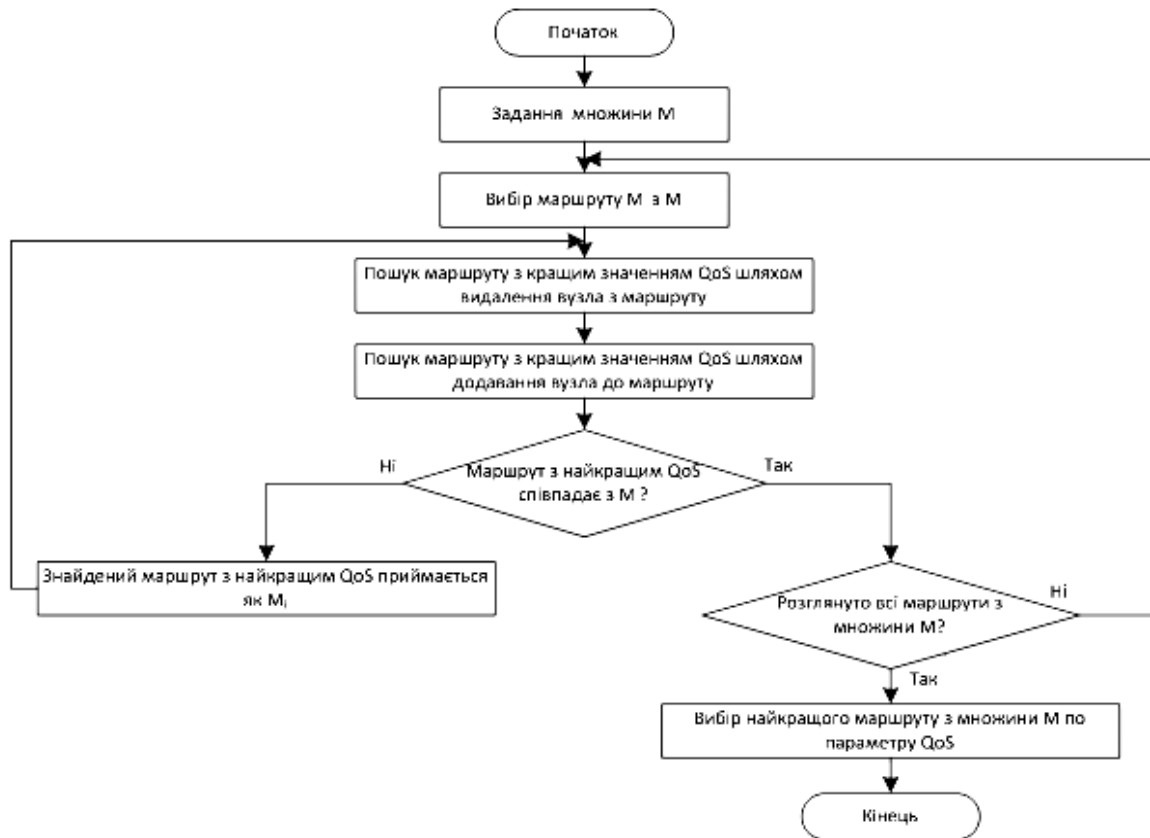


Рис. 3. Узагальнена блок-схема запропонованого алгоритму імітації відпаду

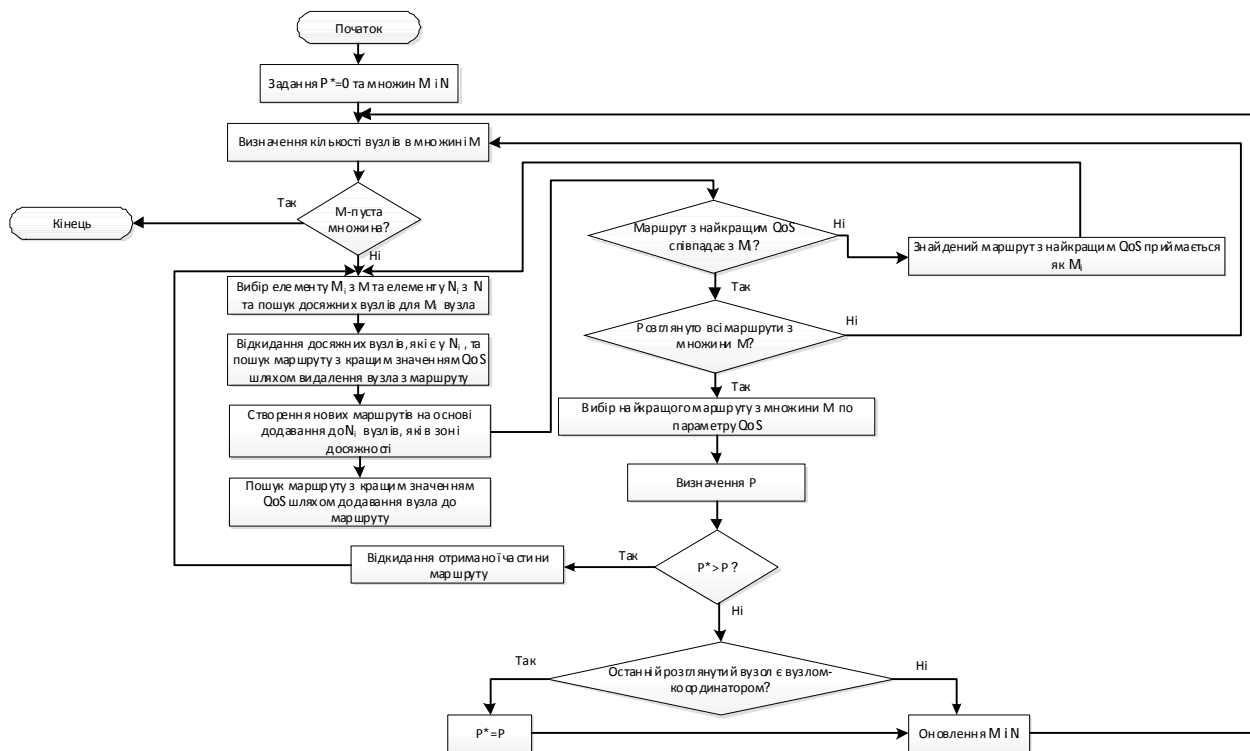


Рис. 4. Розроблений алгоритм маршрутизації інформаційних потоків

- 5.2. Якщо ні, то переходимо до пункту 6.
6. Знайдений маршрут з найкращим значенням параметра QoS приймаємо як M_i .
7. Переходимо до пункту 3.
8. Перевіряємо, чи розглянуто всі маршрути з M .
- 8.1. Якщо ні, то переходимо до пункту 2.
- 8.2. Якщо так, то переходимо до пункту 9.
9. Здійснюємо вибір найкращого маршруту з M на основі значення параметра QoS.
10. Завершення роботи алгоритму.

Комплексний метод оптимізації маршрутизації інформаційних потоків для самоорганізованих мереж

На основі поданих вище модифікованих алгоритмів: мурашкового та імітації відпалу пропонуємо використовувати комплексний метод оптимізації маршрутизації, який з оновленої множини кращих маршрутів, що утворюється модифікованим алгоритмом імітації відпалу (рис. 3), здійснює вибір найкращого маршруту за критерієм часу передавання даних з використанням модифікованого мурашкового алгоритму (рис. 2).

Дослідження ефективності оптимізації маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованій Mesh-мережі

Процес моделювання самоорганізованої мережі здійснено для 30 вузлів мережі, розташування кожного з яких вибрано випадково і подано на рис. 5.

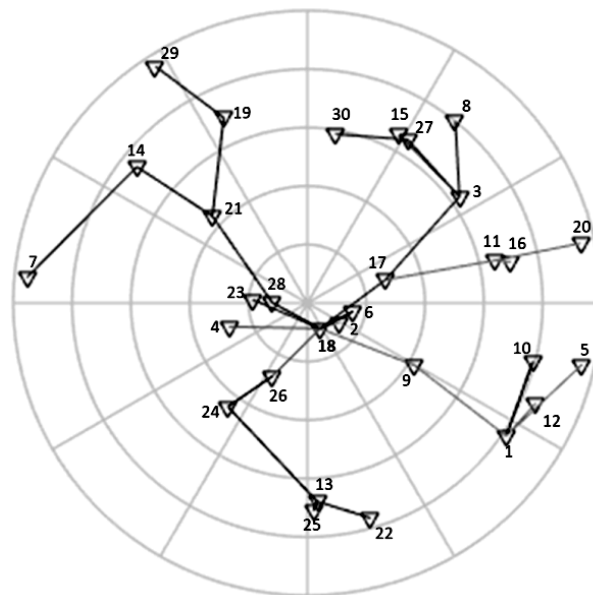


Рис. 5. Розміщення вузлів мережі

На рис. 5 під номером 18 – вузол-координатор.

Для кожного вузла мережі – a визначаємо множину зв'язків його досяжності – Q_a за умови, що для кожної пари вузлів обов'язково існує певний шлях, який їх з'єднує.

Алгоритм генерації трафіку для самоорганізованої мережі подано на рис. 6.

Для прикладу здійснено моделювання модифікованого мурашкового алгоритму на мережі, наведеній на рис. 5.

Результати моделювання показано на рис. 7, де кожна точка (▼) відповідає середньому часу проходження даних від вузла (номер вузла написаний над точкою) до вузла-координатора залежно від найменшої відстані від вузла-джерела до вузла-координатора, наприклад, від 7 до 18. З рис. 7 бачимо, що вузли, розміщені в зоні досяжності вузла-координатора, повинні передавати дані одразу

до вузла 18. В такому випадку недоцільно використовувати окремо взяті алгоритми маршрутизації, зокрема пропонується мурашковий, оскільки тоді виникатиме потреба у використанні транзитних вузлів, що призводить до збільшення часу передачі даних (рис. 6).

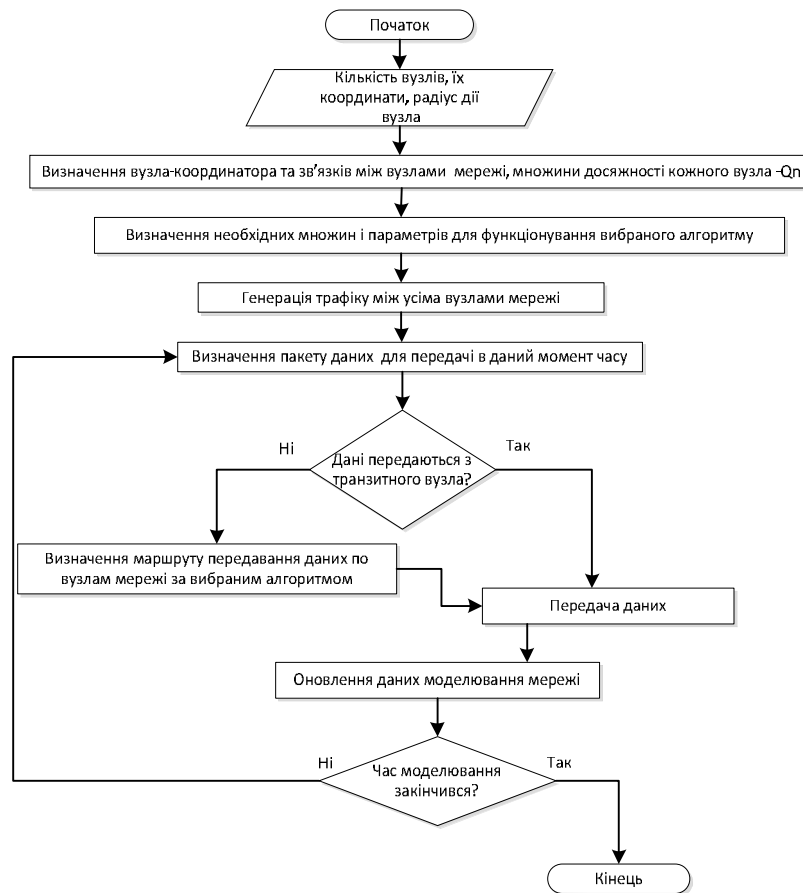


Рис. 6. Алгоритм генерації трафіку для моделювання мережі

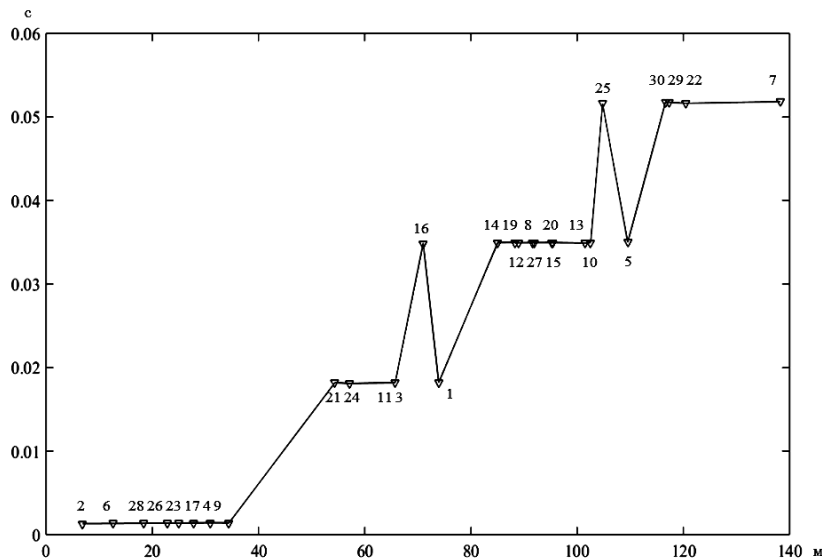


Рис. 7. Залежність часу передачі даних від пройденого шляху для модифікованого мурашкового алгоритму

Отже, головною умовою маршрутизації в самоорганізованих мережах є зменшення кількості транзитних вузлів між вузлом-джерелом і вузлом-координатором, і найдоцільніше використовувати комплексний метод оптимізації маршрутизації інформаційних потоків, особливо у випадку

можливості вибору маршрутів, які характеризуються мінімальною кількістю транзитних вузлів, що дасть змогу найефективніше визначати маршрут з найменшим часом передавання даних.

Висновки

Для визначення найкращого маршруту передавання даних у самоорганізованих мережах у статті запропоновано комплексний метод оптимізації маршрутизації інформаційних потоків. Суть методу полягає у оптимізації множини кращих маршрутів, що утворюються завдяки роботі модифікованих алгоритмів імітації відпалу та мурашкового, використання яких дає змогу знаходити глобальний екстремум деякої функції на основі впорядкованого випадкового пошуку та здійснювати пошук оптимізованого маршруту з кращим значенням параметра QoS на основі видалення/додавання вузла до маршруту, а також враховувати неоднорідності в мережі. Така оптимізація можлива за умови, якщо вузол для видалення/додавання розміщений у спільній зоні досяжності вузлів, які розглядаються. Моделювання показало доцільність використання комплексного методу оптимізації маршрутизації інформаційних потоків для самоорганізованих мереж, оскільки, якщо можливий вибір маршрутів, які характеризуються мінімальною кількістю транзитних вузлів, перевага повинна надаватися маршрутам із найменшим часом передавання даних. Це дасть змогу забезпечити високу працездатність мережі загалом та підтримувати необхідний рівень параметрів QoS для кінцевих користувачів.

1. Vinay Kumar Singh, Vidushi Sharma. Hybrid genetic algorithm based approach for energy efficient routing in wireless sensor nets // *International journal of emerging technologies in computational and applied sciences (IJETCAS)*, 2013, P. 408–413. 2. Marwa Sharawi, Imane Aly Saroit, Heshman El-Mandy, Eid Emary. Routing wireless sensor networks based on soft computing paradigm: survey//*International journal on soft computing. Artificial intelligence and applications(IISCAI)*, vol. 2, No. 4, August 2013. 3. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с. 4. Кудр Лати́ф. Генетический алгоритм маршрутизации беспроводных сенсорных сетей / Лати́ф Кудр, Ю. А. Скобцов // *Проблеми інформаційних технологій*. – 2014. – № 1. – С. 85–91. 5. Chang Wook Ahn, R. S. Ramakrishna A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of populations // *IEEE transactions on evolutionary computation* 6 (6), 2002, P. 566-579. 6. Штовба С. Д. Муравьиные алгоритмы // *Exponenta Pro. Математика в приложениях*. – 2003. – № 4. – С. 70–75. 7. Коваленко А. М. Разработка алгоритма направленной маршрутизации для беспроводных сенсорных сетей / В. А. Дидук, А. М. Коваленко, Е. Г. Трофименко // *Труды Одесского политехнического университета*. – 2011. – Вып. 1(35). – С. 151–154. 8. Gendreau M. Metaheuristics for the vehicle routing problem / M. Gendreau, G. Laporte, J.- Y. Potvin // *Technical Report CRT-963, Centre de Recherche sur les Transports*. – Universit de Montral, jan 1994. 9. Ingber L. Simulated annealing: Practice versus theory // *Mathematical and Computer Modeling* 18(11), 1993, P.29–57. 10. Klymash Y. Modified routing algorithms for self-organized network / Y. Klymash, M. Kaidan, B. Strykhaluk // *Advanced Trends in Radioelektronics, Telecommunications and Computer Engineering Modern, Proceedings of the 14th International Conference TCSET'2018 (Lviv-Slavske, Ukraine February 20–24, 2018)*. 11. Ипатов А. В. Модифицированный метод имитации отжига в задаче маршрутизации транспорта, *Тр. ИММ УрО РАН*, 2011, Т. 17, № 4. – С. 121–125.

References

1. Kumar Singh, Vinay, Sharma Vidushi (2013), “Hybrid genetic algorithm based approach for energy efficient routing in wireless sensor nets”, *International journal of emerging technologies in computational and applied sciences (IJETCAS)*, pp. 408–413. 2. Sharawi, M., Aly Saroit, I., El-Mandy, H., Emary, E. (2013), “Routing wireless sensor networks based on soft computing paradigm”, *International journal on soft computing. Artificial intelligence and applications(IISCAI)*, vol. 2, No. 4, August. 3. Emelyanov V. V., Kureychik V. V., Kureychik V. M. (2003), “Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya”, М.: FIZMATLIT, 432 p. 4. Latif, Kudr, Skobtsov Yu. A. (2014), *Geneticheskiy algoritm*

marshrutizatsii besprovodnyih sensoryih setey. *Problemi Informatsiynih tehnologiy*, No.1, pp. 85–91.

5. Wook Ahn, Ch., Ramakrishna, R. S. (2002). A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of populations. *IEEE transactions on evolutionary computation* 6 (6), pp. 566–579.

6. Shtovba S. D. (2003) Muravinye algoritmyi. *Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyah*, No.4, pp. 70–75.

7. Kovalenko A.M. (2011) Razrabotka algoritma napravlennoy marshrutizatsii dlya besprovodnyih sensoryih setey. *Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta*, Vyip. 1(35), pp. 151–154.

8. Gendreau M. (1994) *Metaheuristics for the vehicle routing problem*. Technical Report CRT-963, Centre de Recherche sur les Transports. – Universit de Montral.

9. Ingber, L. (1993) *Simulated annealing: Practice versus theory*. *Mathematical and Computer Modeling* 18(11), pp. 29–57.

10. Klymash Y., Kaidan M., Strykhalyuk B. (2018) Modified routing algorithms for self-organized network. *Advanced Trends in Radioelektronics, Telecommunications and Computer Engineering Modern, Proceedings of the 14th International Conference TCSET'2018 (Lviv-Slavske, Ukraine February 20–24, 2018)*.

11. Ipatov A. V. (2011) Modifitsirovannyiy metod imitatsii otzhiga v zadache marshrutizatsii transporta. *Tr. IMM UrO RAN*, 2011, Tom 17, No. 4, pp. 121–125.