

УДК 004.2

Г. В. Олійник, аспірантка,**С. В. Грибков**, канд. техн. наук, доцент

Національний університет харчових технологій, м. Київ

МОДИФІКОВАНИЙ АСО АЛГОРИТМ ПОБУДОВИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНУ ВИКОНАННЯ ДОГОВОРІВ

Запропоновано модифікований АСО (ant colony optimization) алгоритм для вирішення задачі побудови календарного плану виконання договорів для підприємств, діяльність яких пов'язана з наданням послуг. Використання наведеного алгоритму дозволяє підвищити ефективність та мінімізувати час для її розв'язання.

Ключові слова: *планування виконання договорів, математичне моделювання, АСО, генетичний алгоритм.*

Вступ. Задача планування виконання договорів для підприємств, які діють у сфері надання послуг, відноситься до класу багатокритеріальних комбінаторних задач, оскільки умовою отримання рішення є не тільки досягнення основної цілі здобуття максимального прибутку для підприємства, а й відповідність наявним вимогам узгодженості багатьох факторів та необхідність врахування норм, відхилення від яких вимагає прийняття додаткових координуючих рішень. Пошук, адаптація та модифікація методів вирішення подібних задач є актуальним завданням, тому що зі збільшенням розмірності задачі виникає гостра необхідність значної мінімізації часу на знаходження її рішення.

Постанова задачі. У роботі [1] авторами запропоновано математичну модель задачі побудови календарного плану виконання договорів для підприємств, діяльність яких пов'язана з наданням послуг, та на основі проведеного огляду існуючих підходів і методів розв'язку подібних задач зроблений висновок щодо доцільності використання АСО алгоритму при її вирішенні. Внаслідок математичного моделювання виділено узагальнений критерій оцінки ефективності отриманого рішення F_0 . Наведений критерій отримується шляхом виконання адитивної згортки чотирьох окремих критеріїв, а саме: за часом виконання договорів, за часом запізнення виконання договорів, за сумарним розміром штрафів за затримку виконання, за сумарною вартістю виконання договорів за заданий період. Крім цього, у [1] зроблено висновок про важливість використання поліпшувючих модифікацій основних етапів АСО алгоритму з метою його адаптації до конкретного класу задач та збільшення швидкості знаходження рішення, близького до оптимального. Виходячи з вищевказаного, з урахуванням NP -складності задачі планування виконання

договорів, для її розв'язку необхідно удосконалити АСО алгоритм для підвищення ефективності та швидкості знаходження найкращих варіантів рішень шляхом адаптації до різних вхідних даних за рахунок використання поліпшуючих модифікацій, комбінування та використання ідей еволюційних алгоритмів.

Результати дослідження. Основна ідея АСО алгоритму відображає специфіку поведінки мурах, які вирішують проблему пошуку шляхів за допомогою хімічної регуляції. Кожна мураха (агент) відмічає пройдений шлях за допомогою особливих речовин — феромонів (відміток). Чим більша кількість агентів пройшла одним шляхом, тим більш вираженим він буде, і, як наслідок, зростає «бажання» обрати цей напрям у інших агентів. Оскільки для подолання відстані найкоротшого шляху потрібно витратити менше часу, він швидко стає більш помітним, ніж інші. В цілому, такий алгоритм є досить простим і зводиться до багатозарового обходу деякого орієнтованого графа, дуги якого мають не тільки вагу, а й додаткову кількісну динамічно змінвану характеристику, в якості якої виступають значення залишених відміток. В алгоритмі застосовуються наступні показники: пам'ять агента, рух агента, пройдений агентом шлях, оновлення рівня відміток. Кожний агент здійснює перехід між вузлами за одну ітерацію, а при переході використовує власну пам'ять, де зберігається перелік вузлів, які він повинен відвідати [2, 3].

З метою застосування АСО алгоритму для задачі планування виконання договорів, враховуючи особливості предметної області, вхідні дані про етапи виконання договорів представляємо у вигляді багатошарового графа, у якому один шар відповідає виконанню робіт одного виконавця. Використання такого способу зводить задачу формування оптимального плану виконання договорів до задачі пошуку оптимального маршруту на кожному з шарів графа, з дотриманням при цьому загальної узгодженості та відповідності індивідуальним вимогам у виконанні. В якості вузлів графа використовуємо моменти часу, в які буде відбуватися перехід від виконання одного етапу до іншого. Ребра кожного шару графа, їх ваги та з'єднувані ними вузли визначаються тривалістю виконання етапу послуги [4]. Крім цього, для всіх шарів графа введено додаткові ребра, які відповідають одиничним проміжкам між вузлами, та призначені для можливості обробки виникнення простою у виконанні.

Умовою отримання варіанту плану виконання етапів договору є відвідання агентом не всіх вузлів графа, а використання усіх різних ребер для формування одного повного шляху. Оскільки вузли відповідають моментам часу, зупинка у кожному з них не завжди означає необхідність переходу до наступного найближчого вузла іншим ребром, а лише надає можливість для дотримання узгодженості між проведенням робіт різними виконавцями. Таким чином, при використанні ідей АСО алгоритму на наведеному багатошаровому графі відбу-

вається формування шляху для кожного шару графа, що представляє собою список ребер для відвідування певним виконавцем.

Для узгодження дій всіх виконавців необхідним є паралельне їх проходження по одному кожним шаром графа під час побудови одного варіанта рішення. Фактично, агент під час побудови варіанта рішення виступає у ролі виконавця. У кожному вузлі графа відбувається зупинка і визначаються подальші дії: продовження проходу поточним ребром, якщо час виконання етапу ще не вичерпаний, або здійснення вибору наступного ребра відповідно до ймовірно-пропорційного правила АСО алгоритму. Таким чином проводиться «по-тактова синхронізація» усіх шарів графа. Причому, для вибору ребра для подальшого переходу з урахуванням послідовності виконання етапів договорів та здійсненням їх на різних шарах графу, необхідно також враховувати усі завершені в цей момент етапи. А отже, всі спільні по-вертикалі вузли кожного шару графу мають становити єдине ціле і містити однакову інформацію про завершені в цей момент часу роботи всіма виконавцями. Отже, вибір ребра здійснюється не з усього переліку ще не відвіданих ребер. Фактично, до розгляду приймаються тільки ті ребра, для яких відповідні їм етапи можуть бути виконані згідно зі здійсненими у даний момент часу попередніми етапами. Як наслідок, вибір ребра для переходу здійснюється не лише на основі пам'яті агента, а й вимагає введення пам'яті вузла, вміст якої оновлюється для кожного нового проходу набором агентів, кількість яких для одного такого набору дорівнює кількості виконавців.

В основу комбінованого алгоритму для розв'язання задачі планування виконання договорів покладені наступні кроки.

1. Формуємо послідовності виконання етапів для кожного договору згідно з встановленими індивідуальними вимогами до їх здійснення, враховуючи при цьому можливість паралельної роботи над деякими окремими етапами.

2. Задаємо статичні шаблони виконання для таких договорів, для яких існує необхідність здійснити деякі етапи обов'язково підряд, або здійснити деякий етап до заданого часу. Таким чином, шаблон фіксує перехід від одного вузла до іншого, або визначає значення часу, коли саме необхідно бути в заданому вузлі.

3. Обчислюємо загальну кількість агентів для застосування АСО алгоритму за формулою (1).

$$b = m * ((g - 1) * \omega_n * \max_l \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{J_i} y_{ijl})!, \quad (1)$$

де m — кількість виконавців, задіяних у виконанні договорів за плановий період; l — номер виконавця, $l \in M$, $M = \{1, 2, \dots, m\}$ — множина

виконавців; g — кількість вузлів на площині графа; n — кількість договорів, які необхідно виконати за плановий період; ω_n — загальна кількість етапів для n договорів; i — номер договору; J_i — множина етапів i -го договору; j — номер етапу з множини етапів, $j \in J_i$; y_{ijl} — параметр, що приймає значення $\{0,1\}$: $y_{ijl} = 1$, якщо j -ий етап i -го договору виконується l -им виконавцем; $y_{ijl} = 0$ в іншому випадку.

4. Визначаємо кількість «елітних» агентів, тобто таких, які рухаються тільки найкращими знайденими на попередніх ітераціях маршрутами.

$$b_{el} = \frac{b}{2 * e}, \quad (2)$$

де $e \approx 2.718$ [2, 5].

Використання «елітних» агентів забезпечує швидкість знаходження оптимального рішення, що є дуже важливим, оскільки в реальних ситуаціях необхідно підтримувати баланс між якістю запропонованих рішень та часом роботи алгоритму. Збільшення кількості спеціальних агентів є досить ефективним способом, що дозволяє значно скоротити число ітерацій всього алгоритму. Проте занадто велика їх кількість призводить до зупинки алгоритму на неоптимальному рішенні.

5. Встановлюємо випадкові допустимі значення коефіцієнтів АСО алгоритму, що впливають на ефективність його роботи, а саме: α — вага феромону, $0 \leq \alpha \leq 1$, яка визначає відносну значимість впливу інтенсивності відміток на вибір шляху, при $\alpha = 0$ буде обрано найкоротше ребро для переходу, при $\alpha = 1$ буде вибрано ребро, на якому рівень відміток найбільший; p — коефіцієнт оновлення рівня відміток, $0 \leq p \leq 1$, який визначає відносне його зниження в часі; Q — параметр, значення якого має бути близьким з довжиною оптимального для поточної ітерації маршруту; A — коефіцієнт «важливості» спеціальних агентів, який визначає міру підсилення варіанту шляху.

6. Визначаємо із співвідношення кількості звичайних та спеціальних агентів до номеру поточної ітерації якого агента використати. Якщо обираємо звичайного — переходимо до кроку 7, спеціального — 13.

7. Перевіряємо чи всі ребра вже пройдені. Якщо так — переходимо до кроку 11, якщо ні — до кроку 8. Причому, при розрахунку пройденого шляху не враховуються ті пройдені ребра у кінці шляху, для яких на певних часових проміжках всі етапи для даного виконавця вже виконані — враховується тільки довжина шляху, ребра у якому відповідають виконанню робіт та затримці між ними.

8. Перевіряємо чи пройдене на даний момент часу поточне ребро (завершений виконуваний етап). Якщо так — крок 9, інакше — крок 7.

9. Додаємо дані про здійснений етап у пам'ять вузла та видаляємо з пам'яті агента.

10. Перевіряємо можливість виконання наступного етапу, враховуючи необхідну послідовність виконання та дані у пам'яті вузла. Якщо така можливість є — визначаємо за модифікованим ймовірно-пропорційним правилом, або, дотримуючись наявних шаблонів, наступне ребро для переходу (етап для виконання). У випадку необхідності виконання етапу, що має пару у шаблоні, відразу, без розрахунку, визначається яке ребро буде наступним. Якщо можливість відсутня — переходимо додатковим ребром.

11. Відмічаємо пройдений агентом шлях та очищаємо пам'ять вузлів, готуючи граф для проходу наступним агентом.

12. Оновлюємо рівень відміток на всіх ребрах, пройдених агентом. Для цього розраховуємо значення узагальненого критерію F_0 для поточного варіанту рішення, який представляє собою маршрут $T_k(t)$, пройдений k -тим агентом на ітерації t . Рівень відміток визначаємо за формулою (3).

$$\Delta\tau_{ur,k}(t) = \begin{cases} \frac{1}{F_0} * \frac{Q}{L_k(t)}, & \text{якщо } (u, r) \in T_k(t), \\ 0, & \text{якщо } (u, r) \notin T_k(t), \end{cases} \quad (3)$$

де u та r — індекси пари вузлів, що поєднують ребро яким пройшов агент; $L_k(t)$ — довжина маршруту $T_k(t)$.

13. Посилуємо найкращі знайдені рішення за допомогою відмітки спеціальних агентів. Значення відміток на кожному ребрі, яке залишається k -тим спеціальним агентом запропоновано визначати за формулою (4).

$$\Delta\tau_{ur,k}(t) = A * \frac{1}{F_0} * \frac{Q}{L_k(t)}. \quad (4)$$

14. Перераховуємо значення коефіцієнтів α , p , Q , A з використанням генетичного алгоритму за наступною схемою:

- використовуємо наявні їх значення для отримання початкового набору хромосом.
- обчислюємо коефіцієнт виживання — кожному рішенню (хромосомі) ставиться у відповідність певне числове значення, залежне від близькості цього рішення до кращого, отриманого на даний момент варіанту, за значенням загальної оціночної функції [1], посиленого «спеціальними» агентами;
- виконуємо відтворення — хромосоми, що мають великий коефіцієнт виживання (більше числове значення), потрапляють до нащад-

ків з більшою ймовірністю, а потім здійснюються оператори схрещування та мутації;

- формуємо наступне покоління, отримані значення параметрів якого буде використовувати наступний набір агентів при знаходженні шляху.

15. Порівнюємо поточні рішення з отриманими на попередніх ітераціях та перевіряємо їх на оптимальність за допомогою розрахунку узагальненого критерію. Якщо знайдені рішення найкращі, або вже використані усі звичайні та спеціальні агенти, — переходимо до кроку 16, інакше — крок 6.

16. Виводимо отримані результати, які є варіантом сформованого плану виконання етапів договорів. Отриманий варіант рішення включає в себе послідовності виконання етапів договорів планового періоду, покладені на часову шкалу.

Наведений алгоритм враховує особливості предметної області, дозволяє за менший, у порівнянні з класичним АСО алгоритмом, час знайти варіанти рішення, близькі до оптимального. Крім цього, в результаті проведених з різними варіантами вхідних даних експериментів було встановлено, що розв'язок задачі із збільшенням розмірності задачі у відповідності з реальними вимогами, для класичного АСО алгоритму витрачав значно більше кількості часу, ніж наведений алгоритм.

Висновки. Запропонований алгоритм для розв'язку задачі планування виконання договорів при експериментальних дослідженнях показав свою ефективність, що полягає у зменшенні часу для пошуку оптимального значення. Також, алгоритм адаптований для розв'язання прикладних задач формування розкладу виконання замовлень. Авторами створено програмний модуль для реалізації запропонованого алгоритму, який буде використано при розробленні системи підтримки прийняття рішень при плануванні виконання договорів для підприємств, діяльність яких пов'язана з наданням послуг.

Список використаних джерел:

1. Грибков С. В., Литвинов В. А., Олійник Г. В. Задача планування виконання договорів та підходи до її ефективного вирішення. *Математичні машини і системи*. 2015. № 2. С. 61–70.
2. Зайченко Ю., Мурга Н. Исследование муравьиных алгоритмов оптимизации в задаче коммивояжера. *International Journal «Information Models and Analyses»*. 2013. Vol. 2, N 4. С. 370–384.
3. Dorigo, M., Birattari, M., Blum, C., Clerc, M., Stützle, Th., Winfield, A. (Eds.) *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*, 6th International Conference, ANTS 2008, Brussels, Belgium, September 22–24, 2008, Proceedings.
4. Олійник Г. В. Представлення вхідних даних при плануванні послідовності виконання етапів договорів. Матеріали XXII Міжнародної конференції

з автоматичного управління «*Автоматика 2015*». Одеса: Одеський національний політехнічний університет, 2015. С. 171–173.

5. Гусейн-Заде С. М. Разборчивая невеста. М.: МЦНМО, 2003. 24 с.
6. Stützle T., López-Ibáñez M., Pellegrini P., Maur M., M. de Oca, Birattari M., Michael Maur, Dorigo M. Parameter Adaptation in Ant Colony Optimization. Technical Report, IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, 2010.

Modified ACO algorithm for solving the problem of constructing schedule of contracts execution for companies engaged in the provision of services is proposed. Using of proposed algorithm allows to increase efficiency and to minimize times for its resolving.

Key words: *planning of contracts execution, mathematical modeling, ACO, genetic algorithm.*

Одержано 14.02.2017

УДК 004.056.5

О. О. Перекопський, аспірант

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДОКАЗУ ВИКОНАНОЇ РОБОТИ ТА ВІЗАНТІЙСЬКОЇ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ

Представлений порівняльний аналіз механізмів досягнення консенсусу на основі доказу виконаної роботи та Візантійської відмовистійкості, у контексті таких важливих властивостей реєстру Blockchain, як управління ідентифікаторами вузлів та завершеності механізму досягнення консенсусу.

Ключові слова: *криптовалюта, механізм досягнення консенсусу, доказ виконаної роботи, Візантійська відмовистійкість, реєстр Blockchain.*

Вступ. Криптовалюта Bitcoin продемонструвала практичну цінність глобального досягнення консенсусу серед тисячі вузлів, назавжди змінивши світ цифрових транзакцій. На ранніх стадіях розвитку криптовалюти Bitcoin, проблема продуктивності технології Blockchain, заснованої на імовірнісному доказі виконаної роботи, не була пріоритетною. Криптовалюта Bitcoin стала успішною, незважаючи на затримки досягнення консенсусу (до години) і теоретичної пікової пропускну спроможності тільки до 7 транзакцій в секунду.

На сьогоднішній день ситуація докорінно змінилася — низька продуктивність реєстрів Blockchain на основі доказу виконаної роботи стає неактуальною. Зокрема, ряд сучасних платформ криптовалюти, призначених для довільних розподілених додатків на технології Blockchain, потребують набагато більш високої продуктивності. Однак такий підхід змушує платформи криптовалюти відійти від своєї