

Красников С.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АЛГОРИТМ НАЛАШТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АЛГОРИТМУ ІМІТАЦІЙНОГО ВІДПАЛУ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА

Розглянуто важливість розв'язку задач комбінаторної оптимізації та описано три варіації алгоритму імітаційного відпалу для розв'язання задачі комівояжера. Запропоновано алгоритм налаштування параметрів для трьох реалізацій алгоритму імітаційного відпалу та проведено обчислювальний експеримент із його застосування. Отримані результати порівняно із випадком, коли параметри підбираються експертно. Показано, що застосування алгоритму налаштування параметрів в алгоритмі імітаційного відпалу підвищило його ефективність порівняно з експертним підбором параметрів.

Ключові слова: задача комівояжера, детермінований локальний пошук, алгоритм імітаційного відпалу, налаштування параметрів.

Постановка проблеми. У житті трапляється багато ситуацій, коли треба побудувати оптимальний шлях для проходження потрібних пунктів. Також задача оптимізації шляху для зварювання в електронних платах [1, с. 1]. Багато задач базується на розв'язанні задачі комівояжера. Так, у статті “Traveling Officer Problem: Managing Car Parking Violations Efficiently Using Sensor Data” сформульована задача офіцера, яка полягає в оптимізації обходу автомобільної стоянки для піймання порушника [2]. Ще одним прикладом є завдання пошуку оптимальних туристичних маршрутів, що описано в статті «Методика вирішення завдань пошуку оптимальних туристичних маршрутів алгоритмами наслідування мурашиної колонії» [3]. Інші можливі модифікації задачі комівояжера, як-от задача кур'єра, гамільтонівська задача про розміщення, наведені у роботі «Задача комівояжера» [4, с. 7–8]. Таким чином, модель задачі комівояжера має безпосереднє застосування та полігон для дослідження оптимізаційних задач.

Але задача комівояжера є NP-повною, що доведено в роботі “A short tour of combinatorial optimization and computational complexity” [5, с. 28–29] Для розв'язання задачі комівояжера використовується багато алгоритмів комбінаторної оптимізації. В роботі Л.Ф. Гуляницького і О.Ю. Мулеса [6, с. 23] надається класифікація основних наближених методів комбінаторної оптимізації. Серед таких алгоритмів можна виділити алгоритми стохастичного локального пошуку. Одним із відомих алгоритмів стохастичного локального пошуку є алгоритм імітаційного

відпалу. Розглянемо, які дослідження для цього алгоритму були опубліковані за останні 5 років.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для дослідження алгоритму імітаційного відпалу було опубліковано багато статей. Проводився аналіз трудомісткості алгоритмічних підходів для розв'язування задачі комівояжера [7]. Іншим дослідженням було використання метаевристичних алгоритмів із метою мінімізації холостого шляху для ріжучого інструмента [8], серед яких використовується алгоритм імітаційного відпалу.

Але, на жаль, у цих статтях не описуються параметри для алгоритмів. А з наукових експериментів відомо, що результат алгоритму суттєво залежить від значення параметрів.

Постановка завдання. Основною метою статті є розробка алгоритму для налаштування параметрів алгоритму імітаційного відпалу для розв'язування задачі комівояжера. Також розглядаємо 3 варіації алгоритму імітаційного відпалу і за допомогою алгоритму підбираємо параметри.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Постановка задачі комівояжера

Дається множина n міст, відстань між якими відома. Треба побудувати такий шлях обходження міст, щоб сумарна довжина маршруту була мінімальною [6, с. 13].

Математично задача описується таким чином. Є граф $G=(V, E)$ де V – множина міст, які отожднюються між містами, E – множина ребер, d_{ij} – довжина шляху $e_{ij} \in E$. Необхідно знайти гамільтонів цикл мінімальної довжини [6, с. 14].

Розв'язок задачі комівояжера може бути подано як послідовність обходу міст $P = (p_1, \dots, p_n)$. Також

для утворення гамільтонового циклу додатково ставиться умова $p_{n+1} = p_1$. Тоді цільова функція буде виглядати таким чином:

$$\sum_{i=1}^n d_{p_i, p_{i+1}} \rightarrow \min$$

Стохастичний локальний пошук

Алгоритми стохастичного локального пошуку належить до класу метаевристичних ітераційного типу. Основною відмінністю порівняно з детермінованим локальним пошуком є введення нової функції – імовірність прийняття розв’язку, що гірше від поточного розв’язку. Загальна схема стохастичного локального пошуку виглядає таким чином [6, с. 51]:



Рис. 1. Загальна схема стохастичного локального пошуку

Одним із найвідоміших алгоритмів стохастичного локального пошуку є алгоритм імітаційного відпалу. Його псевдокод виглядає таким чином:

```

procedure findSolutionWithSAAlgorithm( $x_{parent}, T_0$ )
begin
 $T_{current} = T_0$ 
 $x_{best} = x_{parent};$ 
 $f_{best} = f_{parent};$ 
while (не виконується умова закінчення роботи алгоритму) do
while (не виконується умова рівноваги) do
 $x_{child} = \text{ЗгенеруватиСусіда}(x_{parent});$ 
 $\Delta = (f_{child} - f_{parent}) / f_{parent};$ 
if ( $\Delta < 0$ ) then
 $x_{parent} = x_{child};$ 
 $f_{parent} = f_{child};$ 

```

```

if ( $f_{best} > f_{child}$ ) then
 $x_{best} = x_{child};$ 
 $f_{best} = f_{child};$ 
end
end
else
p = Найти вероятность перехода ( $T_{current}$ );
 $\xi = \text{rand}[0, 1);$ 
if ( $p \geq \xi$ ) then
 $x_{parent} = x_{child};$ 
 $f_{parent} = f_{child};$ 
end
end
end
 $T_{current} = \text{ЗменшитиТемпературу}(T_{current});$ 
end
return  $x_{best}$ 
end

```

де x – шлях, f – довжина шляху. Ключовими аспектами для цього алгоритму є:

- умова закінчення алгоритму;
- умова досягнення умови рівноваги;
- вибір початкової температури;
- спосіб за яким зменшується температура;
- спосіб генерації сусідів.

Для дослідження умовою дослідження алгоритму є досягнення поточної температури $T_{current}$ мінімального значення T_{min} або коли був здійснений обхід усіх сусідів для шляху x_{parent} . Як умова рівноваги розглядаються три варіанти:

- за визначеною кількістю ітерацій наведений як приклад у роботі «Metaheuristic From Design to implementation» [9, с. 128];
 - за визначеною кількістю переходів;
 - за метод прогонів та переходів, наведений у роботі Л.Ф. Гуляницького і О.Ю. Мулеса [6, с. 58].
- Спосіб, за яким зменшується температура, є геометричне зменшення:

$$T = \alpha \times T$$

де α – коефіцієнт зменшення температури. Як спосіб генерації сусідів використовується оператор 2 заміна, який детально описаний у роботі «Metaheuristic From Design to implementation» [9, с. 91].

Бачимо, що для алгоритму імітації відпалу є достатня кількість параметрів. Загальними для трьох умов рівноваги є початкова температура, коефіцієнт зменшення температури та мінімальна температура.

Для кожної умови рівноваги додаткові параметри до загальних є:

- за визначеною кількістю ітерацій: кількість ітерацій;

– за визначеною кількістю переходів: кількість переходів;

– за метод прогонів та переходів: кількість переходів та мінімальне порівняне відхилення прогонів.

Для налаштування параметрів алгоритму відпалу сформулюємо і розв’яжемо задачу знаходження оптимальних параметрів в обмеженій решітці.

Механізм підбору параметрів

Маємо n параметрів. Введемо вектор параметрів $X=(x_1, \dots, x_n)$. Також для кожного параметру задається мінімальне $X_{\min} = (x_{1\min}, \dots, x_{n\min})$, максимальне $X_{\max} = (x_{1\max}, \dots, x_{n\max})$ значення для кожного параметра та дискрет для кожного параметра $\Delta X_{\min} = (\Delta x_1, \dots, \Delta x_n)$. Ці параметри використовуються при розв’язуванні задачі комівояжера алгоритмом імітаційного відпалу SA з відповідною умовою рівноваги з початковими шляхами для задачі $R = (r_1, r_2, r_3)$.

Знаходимо довжину для кожного кращого шляху $R_{\text{best}} = (r_{1\text{best}}, r_{2\text{best}}, r_{3\text{best}})$ за допомогою алгоритму $L_{\text{best}} = (l_{1\text{best}}, l_{2\text{best}}, l_{3\text{best}})$. Після чого знаходимо середню довжину L_{average} . Результат описаного процесу знаходження кращого шляху та довжину шляхів позначимо як $F(r_1, r_2, r_3, X)$. Тоді задача налаштування параметрів виглядає так:

$$F(r_1, r_2, r_3, X) \rightarrow \min$$

Дискрет відіграє важливу роль і визначає точність, з якою треба знайти значення параметрів. Окрім цього, важливо підібрати початкові параметри для алгоритму. Наприклад, можна використати середні значення параметрів алгоритмів імітаційного відпалу.

Зміна параметрів у решітці відбувається в одиничному околі шляхом зменшення або збільшення значення компоненти на величину дискрета (якщо це можливо).

Для налаштування параметрів алгоритму імітаційного відпалу використовується детермінований локальний пошук, який описує у праці І.В. Сергієнко [10, с. 100–101].

Псевдокод алгоритму налаштування параметрів виглядає таким чином:

```

Procedure алгоритмПідборуПараметрів(SA, X, R)
begin
  Xparent = X;
  Xbest = X;
  Lbest average = ∞;
  while (не пройдені усі можливі варіанти зміни параметрів X) do
    Xchild = ЗгенеруватиНовіЗначенняПараметру(Xparent);
    Знайти Rbest використовуючи SA з параметрами Xchild;
    Знайти довжини Rbest;
    Знайти середню довжину Laverage;
    If (Lbest average > Laverage) then
      Xbest = Xchild;
      Xparent = Xchild;
      Lbest average = Laverage;
    end
  end
return Xbest;
end

```

Розглянемо отримані за допомогою цього алгоритму результати.

Експериментальні результати дослідження

Для експерименту налаштування параметрів алгоритму будемо робити за допомогою задачі eil101.tsp (101 місто), взятої з бібліотеки задач TSPLIB [11]. Для цієї задачі згенеровано 5 початкових шляхів.

Для того щоб порівняти результати програмного налаштування, використаємо результати, отримані експертним шляхом. Для цього використовуємо Microsoft Excel. Оформляємо таблицю таким чином:

Таблиця 1

Фрагмент таблиці для експертного прийняття рішення щодо вибору параметру

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	№ R	T begin	α	N ітерацій	T min	Length R best	Мат Ожидание	Дисперсия	Стандартное отклонение
2	1	7	0,99	4697	0,01	2214			
3	2	7	0,99	4697	0,01	2091			
4	3	7	0,99	4697	0,01	2184			
5	4	7	0,99	4697	0,01	2137			
6	5	7	0,99	4697	0,01	2192	2163,6	2435,3	49,34875885
7	1	7	0,99	4697	0,009	2159			
8	2	7	0,99	4697	0,009	2119			
9	3	7	0,99	4697	0,009	2062			
10	4	7	0,99	4697	0,009	2013			
11	5	7	0,99	4697	0,009	2096	2089,8	3087,7	55,56707658

Порівняння результатів алгоритму та експертного підбору

Параметр	SA з ітераціями		SA з переходами		SA з прогонами та переходами	
	Алгоритм	Експерт	Алгоритм	Експерт	Алгоритм	Експерт
T begin	6.5	7	5.5	9	6	2
α	0.99	0.99	0.98	0.99	0.97	0.98
T min	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Param 1*	4701	4701	650	900	650	1000
Param 2*	-	-	-	-	0.009	0.003
Average Length	638.3333	645.8	629	629.4	629	629
Time finding	1m 44s	-	2m 35s	-	5m 53s	-

*Примітка: в якості Param 1 для SA з ітераціями це кількість ітерацій при одному значенні температури, для SA з переходами та SA з прогонами та переходами це кількість переходів, Param 2 – порівняна похибка прогонів.

Математичне сподівання вираховується як середнє значення від довжин знайдених шляхів. Дисперсія в Excel знаходиться за допомогою функції ДИСП.В, а стандартне відхилення – СТАНДОТКЛОН.В.

Після цього змінюємо один параметр, фіксуємо значення інших параметрів. Запускаємо алгоритм із відповідними параметрами і після цього обираємо найкращий параметр. Важливими критеріями для вибору параметру є математичне сподівання та дисперсія. Обираються параметри таким чином, щоб були кращими. Після цього найкраще значення параметру використовується в подальшій зміні інших параметрів по черзі, доки не визначимо найкращі параметри.

Програмний комплекс для налаштування параметрів був мовою Java.

Запускались алгоритм імітації відпалу та алгоритм налаштування параметрів ноутбука ASUS S56C із процесором Intel Core i5-3317U 1.7ГГц (розганяється до 2.5ГГц), 2 ядра, 4 потоки, оперативна пам'ять 8ГБ.

Для експериментального запуску алгоритму підбору параметрів використовуються такі межі значень алгоритмів:

– початкова температура T begin: від 1 до 10 з кроком 0.5;

– коефіцієнт зміни температури α : від 0.9 до 0.99 з кроком 0.01;

– мінімальне значення температури T min: від 0.001 до 0.01 з кроком 0.001;

– кількість ітерацій: від 55% від кількості сусідів для шляху для 100% з кроком 5%;

– кількість переходів: від 100 до 1 000 з кроком 50;

– порівняна похибка прогонів: від 0.001 до 0.01 з кроком 0.001.

У результаті отримуємо результати, наведені в таблиці 2, де SA – це алгоритм імітаційного відпалу.

Як ми бачимо, середня довжина шляху знайдена за допомогою алгоритму, це кращі ніж використовувати експертний підхід. Також це відбувається швидше і не потребує наявності експертів. Різний час для варіацій алгоритму імітації відпалу пояснюється часом виконання алгоритму з умовою рівноваги.

Висновки. У результаті проведеного дослідження розроблено спеціальний алгоритм налаштування параметрів алгоритму імітації відпалу, проведено експериментальні та експертні випробування для визначення найкращих параметрів задачі комівояжера. В подальшому планується розширити коло задач для дослідження алгоритму, налаштування інших алгоритмів комбінаторної оптимізації (наприклад G-алгоритм, генетичний алгоритм) за допомогою наведеного алгоритму та застосувати цей підхід до інших задач комбінаторної оптимізації.

Список літератури:

1. Meneses S., Cueva R., Tupia M., Guanira M. A genetic algorithm to solve 3D traveling salesman problem with initial population based on a GRASP algorithm. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering. 2017. Vol. 17, no. S1. Pp. S1–S10.
2. Shao W., Salim F. D., Gu T., Dinh N.-T., Chan J. Traveling Officer Problem: Managing Car Parking Violations Efficiently Using Sensor Data. IEEE Internet of Things Journal. 2018. Vol. 5. Issue 2. April. P. 802–810.
3. Литвин В.В., Угрин Д.І. Методика вирішення завдань пошуку оптимальних туристичних маршрутів алгоритмами наслідування мурашиної колонії. Вестник НТУ «ХПІ». 2016. № 21 (1193). С. 48–60.
4. Меламед И.И., Сергеев С.И., Сигал И.Х. Задача коммивояжера. Вопросы теории. Автоматика и телемеханика. 1989. № 9. С. 3–33.

5. Mauricio G.C. Resende, Celso C. Ribeiro. A short tour of combinatorial optimization and computational complexity. Optimization by GRASP, 2016. С. 13–39.
6. Гуляницький Л.Ф., Мулеса О.Ю. Прикладні методи комбінаторної оптимізації. К.: Київський університет ВПІ, 2016. 146 с.
7. Семенов С.С., Педан А.В., Воловиков В.С., Климов И.С. Анализ трудоемкости различных алгоритмических подходов для решения задачи коммивояжера. Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 116–131.
8. Мурзакаев Р.Т., Шилов В.С., Бурылов А.В. Применение метаэвристических алгоритмов для минимизации длины холостого хода режущего инструмента, Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2015. С. 123–136.
9. Talbi El-Ghazali Metaheuristic From Design to implementation. Wiley, 2009. 618 с.
10. Сергиенко И.В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации. Киев: Наукова думка, 1988. 472 с.
11. TSPLIB – IWR, Heidelberg – Uni Heidelberg. URL: <https://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/> (дата звернення 20.09.2018).

АЛГОРИТМ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМА ИМИТАЦИОННОГО ОТЖИГА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЁРА

Рассмотрена важность решения задач комбинаторной оптимизации и описаны три вариации алгоритма имитационного отжига для решения задачи коммивояжера. Предложен алгоритм настройки параметров для трех реализаций алгоритма имитационного отжига и проведён вычислительный эксперимент по его применению. Полученные результаты сравнены со случаем, когда параметры подбираются с помощью эксперта. Показано, что применение алгоритма настройки параметров в алгоритме имитационного отжига повысило его эффективность по сравнению с экспертным подбором параметров.

Ключевые слова: задача коммивояжера, детерминированный локальный поиск, алгоритм имитационного отжига, настройки параметров.

ALGORITHM FOR ADJUSTING THE PARAMETERS OF THE SIMULATED ANNEALING ALGORITHM FOR SOLVING THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM

The importance of the solution of problems of combinatorial optimization is considered and three variations of the simulated annealing algorithm for solving the traveling salesman problem are described. The algorithm of setting parameters for the three realizations of the simulated annealing algorithm is proposed and a computational experiment was conducted on its application. The obtained results are compared with the case when the parameters are selected expertly. It is shown that the application of parameter adjustment algorithm in simulation annealing algorithm has increased its efficiency in comparison with the expert selection of parameters.

Key words: traveling salesman problem, deterministic local search, algorithm for simulation annealing, setting options.