

12. Anderson, B. R. Calculation of the Steady-State Heat Transfer through a Slab-on-Ground Floor [Текст] / B. R. Anderson // Building and Environment. — 1991. — Vol. 26, No. 4. — С. 405–415.
13. Hasnain, S. M. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part II: Cool Thermal Storage [Текст] / S. M. Hasnain // Energy Conversion and Management. — 1998. — Vol. 39. — С. 1139–1153.
14. Sharma, A. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications [Текст] / A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, D. Buddhi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2009. — Vol. 13. — С. 318–345.
15. Weitzmann, P. Numerical Investigation of Floor Heating Systems in Low Energy Houses [Текст] / P. Weitzmann, J. Kragh, C. F. Jensen // Proc. of the Sixth Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. — 2002. — С. 905–912.
16. Weitzmann, P. Modelling Floor Heating Systems Using a Validated Two-Dimensional Ground Coupled Numerical Model [Текст] / P. Weitzmann, J. Kragh, P. Roots, S. Svendsen // Buildings and Environment. — 2005. — Vol. 40/2. — С. 153–163.
17. Романченко, М. А. Енергозберігаючі електротехнології забезпечення стандартів теплового режиму виробничих споруд АПК з електрообігрівними підлогами [Текст] / М. А. Романченко, Д. І. Мазоренко, А. П. Слесаренко, О. С. Сорока // Електрифік. та автоматиз. сільського господарства. — 2006. — № 2. — С. 82–92.
18. Марчук, Г. И. Методы вычислительной математики [Текст] / Г. И. Марчук. — М.: Наука, 1977. — 456 с.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПОТОКАМИ ПИТАНИЯ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАЕМОГО ПОЛА

Приведены результаты теоретических исследований оптимизации режимов управления энергопотоками питания нагревателей многоярусной электропечьлоаккумуляющей системы отопления электрообогревающим полом производственных животноводческих сооружений. Рассмотрены варианты питания нагревателей, как от традиционных, так и нетрадиционных

и возобновляемых источников энергии в трехъярусной нагревательной структуре.

**Ключевые слова:** энергосбережение, энергопоток, автоматизация, микроклимат, алгоритм.

*Слесаренко Анатолий Павлович, доктор фізико-математичних наук, професор, Лауреат Державної премії України, ведучий науковий співробітник, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Україна.*

*Романченко Микола Анастасійович, кандидат технічних наук, професор, кафедра інтегрованих електротехнологій та процесів, Харківський національний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, Україна.*

*Сорока Олександр Степанович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, кафедра мікроелектроніки, електронних приладів і пристроїв, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.*

*Слесаренко Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, лауреат Государственной премии Украины, ведущий научный сотрудник, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Украина.*

*Романченко Николай Анастасиевич, кандидат технических наук, профессор, кафедра интегрированных электротехнологий и процессов, Харьковский Национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенка, Украина.*

*Сорока Александр Степанович, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра микроэлектроники, электронных приборов и устройств, Харьковский Национальный университет радиоэлектроники, Украина.*

*Slesarenko Anatoliy, A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine.*

*Romanchenko Nikolay, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Ukraine.*

*Soroka Alexander, Kharkiv National University of Radioelectronics, Ukraine.*

УДК 656.025.6

**Малахова О. А.,  
Шевченко О. В.**

## УДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАГОНОТОПОКІВ ШЛЯХОМ РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ

Раціоналізація системи організації вагонопотоків на рівні мережі залізниць дозволяє оптимізувати роботу підрозділів та прискорити оборот вагонів. Це досягається шляхом встановлення раціональної взаємодії технічних станцій та прилеглих дільниць. Задачі раціоналізації маршрутів перевезення відносяться до NP-складних задач комбінаторної оптимізації, вирішення яких можливе за допомогою евристичних методів.

**Ключові слова:** вибір маршруту, раціоналізація перевезення, метод відпау.

### 1. Вступ

Реформування економіки України сприяє вирішенню складних проблем пристосування до роботи в ринкових умовах. Вимоги до якості та ефективності транспортних послуг стрімко йдуть вгору і створюють необхідність інтенсивних пошуків ефективних технологій в перевезенні. Тому, оптимізація маршрутів перевезень стає важливою задачею, вирішення якої надасть змогу скоротити експлуатаційні витрати, забезпечити зростання прибутку, підвищити якість обслуговування.

### 2. Постановка проблеми

Однією з оперативних задач, які щоденно вирішуються на залізничному транспорті при здійсненні вантажних перевезень, є задача забезпечення станцій навантаження порожніми вагонами своєчасно і в потрібному обсязі. При здійсненні переміщень порожніх вагонів між станціями залізничного полігону постає задача пошуку раціональних маршрутів, якими б було можливо здійснити ці переміщення при мінімальних витратах матеріальних та часових ресурсів і в умовах

обмеженої кількості локомотивів. Це складна комбінаторна задача, яку можливо вирішити за допомогою методу відпалу.

### 3. Аналіз основних досліджень та публікацій

Метод відпалу — це техніка оптимізації, що використовує упорядкований випадковий пошук на основі аналогії з процесом утворення речовиною кристалічної структури з мінімальною енергією при охолодженні. В даний час метод відпалу застосовується для вирішення багатьох оптимізаційних завдань — фінансових, комп'ютерної графіки, комбінаторних, в телекомунікаційних мережах, і багатьох інших. Найчастіше метод відпалу використовують для навчання нейронних мереж. Незважаючи на таку широку область застосування, швидкість збіжності методу відпалу все ще мало вивчена. Історія методу відпалу починається з 1953 року. У цьому році М. Метрополісом був розроблений алгоритм симуляції встановлення рівноваги в системі з безліччю ступенів свободи при заданій температурі. На початку 80-х у С. Кіркпатріка вперше з'явилася ідея використовувати цей алгоритм не тільки для моделювання фізичних систем, але і для вирішення деяких задач оптимізації. Величезною перевагою методу відпалу є властивість уникнути «пастки» в локальних мінімумах оптимізуючої функції, і продовжити пошук глобального мінімуму. Це досягається за рахунок прийняття не тільки змін параметрів, що призводять до зменшення значення функції, а й деяких змін, що збільшують її значення, залежно від так званої температурної характеристики модельованого процесу. Чим вище температура, тим більше «погіршуючи» зміни допустимі, і більше їх ймовірність. Ще однією перевагою є те, що навіть в умовах браку обчислювальних ресурсів для знаходження глобального мінімуму, метод відпалу, як правило, видає близькі до оптимального рішення. Л. Інгером показано, що метод відпалу і його модифікації є одним з найбільш ефективних методів випадкового пошуку оптимального рішення для великого класу задач. До теперішнього часу розроблено безліч різних варіантів методу відпалу, як загальних так і їх спеціалізації для конкретних завдань [1–10].

Для вирішення задачі з раціоналізації маршрутів перевезення вагонопотоків застосуємо метаевристический алгоритм вирішення задачі маршрутизації транспорту з обмеженням на пропускну спроможність дільниць заснований на методі імітації відпалу.

Розглянемо зважений орієнтований граф  $G = (V, A, d)$ , где  $V = \{V_0, V_1, \dots, V_n\}$ ,  $A = \{(v_i, v_j) : i \neq j\}$  [4]. Вершина нехай буде технічна станція, де формують поїзди різних категорій, інші вершини назвемо проміжними станціями. Невід'ємні ваги дуг  $d_{ij}$  позначають вартість проїзду з вершини  $v_i$  у вершину  $v_j$ . Для кожної проміжної станції  $v_i$  визначено її замовлення  $q_i$ , тобто кількість вагонів, що відчіпляються у збірному поїзді. Мета завдання — знайти множину маршрутів збірних поїздів сумарної мінімальної вартості, що задовольнить властивостям:

- на кожній проміжній стації проводиться причеплення — відчеплення вагонів;
- маршрути всіх збірних поїздів починаються і закінчуються на технічній станції;
- сумарне замовлення всіх дільничних станцій, відвіданих одним збірним поїздом, вибирається  $Q$ .

Рішення завдання можна зобразити у вигляді графа, що є об'єднанням  $k$  орієнтованих циклів вихідного графа  $G$ , що мають єдиний перетин у вершині  $v_0$ .

Загальна схема методу імітації відпалу. Метод імітації відпалу буде послідовність планів оптимізаційної задачі, починаючи з початкового плану і на  $t$ -й ітерації переходячи від плану  $x_{t-1}$  до плану  $x_t$ . На кожній з ітерацій метод діє таким чином. Спочатку явно чи неявно для плану  $x_{t-1}$  будується  $N(x_{t-1})$  — дискретна випадкова величина, що задає множину «сусідніх» до  $x_{t-1}$  планів і для кожного з сусідніх планів — ймовірність його вибору. Потім, з урахуванням ймовірностей вибору, з округа випадковим чином обирається план  $x$ . Нехай  $f(x)$  — вартість плану  $x$ . Якщо  $f(x) \leq f(x_{t-1})$ , то за подальший розрахунковий обирається план  $x$ . Інакше розрахунок проводиться за правилом

$$x_t = \begin{cases} x, & \text{з верогідністю } p_t; \\ x_{t-1}, & \text{з верогідністю } 1 - p_t, \end{cases}$$

де  $p_t$  — ймовірність переходу до гіршого рішення на  $t$ -й ітерації — деяка функція від  $t$ ,  $x$  і  $x_{t-1}$ . Процес побудови послідовності планів завдання завершується після виконання  $t$  ітерацій. Серед усіх побудованих планів  $x_i$  вибирається план  $x^*$  з найменшою вартістю. Цей план і є результатом роботи алгоритму, що реалізує метод імітації відпалу.

**Опис алгоритму.** В якості початкового плану  $x_0$  візьмемо рішення задачі, знайдене евристикою Кларка-Райта [1]. Нагадаємо, що планом  $P$  задачі є множина дуг графа  $G$ , що розпадаються в діз'юнктне об'єднання орциклів, що проходять через сортувальну станцію. Будемо позначати безліч всіх станцій, що лежать в одному орциклі зі станцією,  $C_i^p$ . Для будь-яких двох станцій  $v_i$  і  $v_j$  очевидно  $C_i^p = C_j^p$  або  $C_i^p \cap C_j^p = \emptyset$ . Евристика:

1. Покладемо  $P = \{(v_i, v_j) \in A \mid i=0, v_j=0\}$ .
2. Обчислимо для кожної пари проміжних станцій  $(v_i, v_j)$  величину  $s_{ij} = d_{i0} + d_{0j} - d_{ij}$ .
3. Будемо перебирати всі пари станцій  $(v_i, v_j)$  за зменшенням величини  $s_{ij}$ . Якщо виконуються наступні умови:

$$(v_i, v_0) \in P,$$

$$(v_0, v_j) \in P,$$

$$C_i^p \neq C_j^p,$$

$$\sum_{v_k \in C_i^p} q_k + X \sum_{v_k \in C_j^p} q_k \leq Q,$$

то положимо  $P = P \setminus \{(v_i, v_0), (v_0, v_j)\} \cup \{(v_i, v_j)\}$ .

Ітерацію проводимо наступним чином. Замість явного побудови округа  $N(x_{t-1})$  скористаємося наступним алгоритмом випадкового зміни плану  $x_{t-1}$  з метою отримання плану  $x$ . Будемо використовувати позначення  $v_{pred(k)}$  і для вершин, які безпосередньо передують і наступних за даною станцією  $v_k$  в плані  $x_{t-1}$ .

1. Нехай  $\Omega_1$  — безліч всіх орциклів, які складають план,  $K = |\Omega_1|$ . Обираємо випадковий елемент з  $\Omega_1$ , вважаючи, що ймовірності вибору кожного з елементів рівня між собою і дорівнюють  $1/K$ . Позначимо вибраний орцикл  $c_s$ .
2. Розглянемо  $\Omega_2$  — множину всіх станцій  $\in c_s$ ,  $n_s = |\Omega_2|$ .

Обираємо випадкову станцію з  $\Omega_2$ , вважаючи, що ймовірність вибору кожної дорівнює  $1/n_s$ . Нехай це станція  $v_s$  із замовленням  $q_s$ .

3. Нехай  $\Omega_3 = \{c_i \in \Omega_1 | i \neq s \text{ \& } q_s + \sum_{v_k \in c_i} q_k \leq Q\} \cup \{c^*\}$ , де  $c^*$  – «порожній» маршрут, тобто орцикл, який містить лише вершину  $v_0$  і не містить жодної дуги. Вважаючи, що всі елементи  $\Omega_3$  рівномірні, виберемо з них випадковий орцикл  $c$ .

4. Видалимо з  $x_{t-1}$  дуги  $(v_{pred(s)}, v_s)$  і  $(v_s, v_{next(s)})$ . Як-що  $v_{pred(s)} \neq v_{next(s)}$ , додамо дугу  $(v_{pred(s)}, v_{next(s)})$ .

5. Якщо  $c = c^*$ , додамо дуги  $(v_0, v_s)$  і  $(v_s, v_0)$ .

6. Інакше маршрут містить хоча б одну станцію. Для стислості запису будемо розуміти під  $v_{next(0)}$  таку станцію у маршруті, що  $v_{pred(next(0))} = v_0$ . Виберемо з усіх  $v_k \in c$  вершину  $v_f$  з мінімальною величиною  $D(v_k) = d_{ks} + d_{s,next(k)} - d_{k,next(k)}$ . Видалимо дугу  $(v_f, v_{next(f)})$  та додамо дуги  $(v_f, v_s)$  і  $(v_s, v_{next(f)})$ .

7. Одержаний в результаті цих дій план є планом  $x$ .

Алгоритм імітації відпалу можна представити у вигляді наступної блок-схеми (рис. 1):

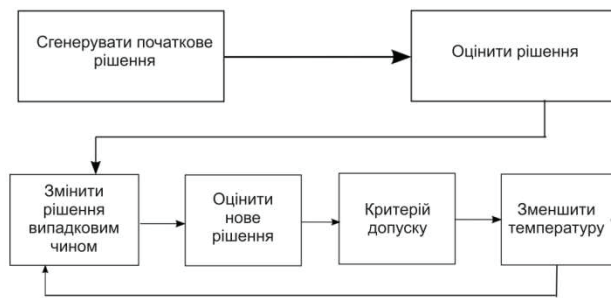


Рис. 1. Алгоритм пошуку раціонального маршруту за допомогою імітації відпалу

#### 4. Висновок

У даній статті розглянута задача оптимізації маршрутів за допомогою методу імітації відпалу. Деякі модифікації методу імітації відпалу дають статистичну гарантію знаходження оптимального рішення. Це означає, що при вірному виборі параметрів алгоритм знайде оптимальне рішення за розумний час без перебору всіх входів, що дозволить мінімізувати час на доставку вантажу і скоротити поточні витрати.

#### Література

1. Clarke, G. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points [Text] / G. Clarke, J. W. Wright // Operations Research. – 1964. – № 12. – P. 568–581.
2. Gendreau, M. Metaheuristics for the vehicle routing problem [Text] / M. Gendreau, G. Laporte, J.-Y. Potvin // Technical Report CRT-963. – Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montreal. – 1999.
3. The VRP Web [Electronic resource]. – Available at: \www/ URL: <http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP>.
4. Решение задачи маршрутизации транспорта методом имитации отжига [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www/ URL: <http://kungurka-old.imm.uran.ru/inf/sbornik09/kung09p290.pdf/>.

5. Метод имитации отжига [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www/ URL: <http://habrahabr.ru/post/112189/>.
6. Ёлкин, Д. Искусственный интеллект. Алгоритм имитации отжига [Электронный ресурс] / Д. Ёлкин, Тяхни, А. // СПбГУ, кафедра КТ. – Режим доступа: \www/ URL: <http://rain.ifmo.ru/cat/data/theory/unsorted/ai-annealing-2008/article.pdf>. – 2008 г.
7. Реферат метод отжига [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www/ URL: [http://www.coolreferat.com/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4\\_%D0%BE%D1%82%D0%B6%D0%B8%D0%B3%D0%B0/](http://www.coolreferat.com/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%BE%D1%82%D0%B6%D0%B8%D0%B3%D0%B0/).
8. Современные аспекты моделирования маршрутов перевозок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.mosresurs.ru/library/articles/137.xhtml>.
9. Кирилл, Н. Метод имитации отжига [Электронный ресурс] / Нетреба Кирилл // Кафедра «Теоретические основы электротехники», СПбПУ. – Режим доступа: \www/ URL: <http://fr.slideshare.net/KirillNetreba/simulated-annealing-for-slideshare>.
10. Алгоритм имитации отжига [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www/ URL: [http://www.math.nsc.ru/AP/benchmarks/UFLP/uflp\\_sa.html](http://www.math.nsc.ru/AP/benchmarks/UFLP/uflp_sa.html).

#### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЕРЕВОЗКИ ВАГОНОПОТОКОВ ПУТЕМ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ МАРШРУТОВ

Рационализация системы организации вагонопотоков на уровне сети железных дорог позволяет оптимизировать работу подразделений и ускорить оборот вагонов. Это достигается путем установления рационального взаимодействия технических станций и прилегающих участков. Задачи рационализации маршрутов перевозки относятся к NP-сложным задачам комбинаторной оптимизации, решение которых возможно с помощью эвристических методов.

**Ключевые слова:** выбор маршрута, рационализация перевозок, метод оджига.

*Малахова Елена Анатоліївна, доцент, кафедра управління експлуатаційною роботою, Українська державна академія залізничного транспорту, Україна.*

*Шевченко Елена Вікторівна, кафедра управління експлуатаційною роботою, Українська державна академія залізничного транспорту, Україна.*

*Малахова Елена Анатольевна, доцент, кафедра управления эксплуатационной работой, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Украина.*

*Шевченко Елена Викторовна, кафедра управления эксплуатационной работой, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Украина.*

*Malakhova Elena, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Ukraine.*

*Shevchenko Elena, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Ukraine.*