

УДК 625.7/.8:338

Ігнатюк В.В.

## ОПТИМІЗАЦІЙНІ МОДЕЛІ В УПРАВЛІННІ СТАНОМ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

**Анотація.** Розглядається проблема розробки моделі оптимізації програми робіт з приведення дорожнього одягу до заданого стану за певну кількість років за допомогою різних методів оптимізації.

**Ключові слова:** математична модель, дорожній одяг, методи оптимізації управління станом дорожнього одягу.

**Аннотация.** Рассматривается проблема разработки модели оптимизации программы работ по приведению дорожной одежды до заданного состояния за определенное количество лет с помощью различных методов оптимизации.

**Ключевые слова:** математическая модель, дорожная одежда, методы оптимизации управления состоянием дорожной одежды.

**Annotation.** The problem of optimizing model development program works to bring the pavement to a given state for a number of years through various optimization methods.

**Key words:** mathematical model, pavement, methods to optimize the management of pavement condition.

### Постановка проблеми

Сучасний стан дорожнього одягу автомобільних доріг України та його покриття на багатьох ділянках не відповідає нормативним вимогам за міцністю, рівністю та зчепленням. За умов недостатнього фінансування проблему приведення стану дорожнього одягу до певного планового рівня можна виконати лише за декілька років. Обґрунтування програми ремонтів дорожніх

одягів за допомогою математичних методів оптимізації актуальне, але являє собою складну техніко-економічну задачу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Згідно літературним оглядам в роботах [1,2] загальний підхід до проблеми підтримання дорожнього покриття у належному стані, запропонований Bryson та Ho (1975), ґрунтується на теорії оптимального управління. Вперше, як проблему оптимального управління, пошук довготривалої оптимальної стратегії ремонту дорожнього покриття визначили Friesz and Fernandez (1979). Стратегії обслуговування були представлені кусочно-постійними інвестиціями протягом певного часу. Пізніше (1981) вони почали розглядати проблему оптимального розподілу років стадійного будівництва доріг [4]. В 1985 році Markow і Balta використовували оптимальне управління для вирішення проблеми оптимальної послідовності ремонтів дорожнього покриття. Оскільки ремонтні роботи спричиняють стрибкоподібні зміни в експлуатаційних якостях дорожнього покриття, які ускладнюють проблему, то автори вирішили її для єдиного варіанту ремонтних дій.

Для того, щоб уникнути труднощів пов'язаних з розривністю стану дорожнього покриття, що спричиняється ремонтом, Tsunokawa і Schofer (1994) використали метод апроксимації для вирішення проблеми оптимального розподілу років та інтенсивності робіт з відновлення покриття. Їх підхід полягав у тому, щоб апроксимувати пилкоподібну криву стану дорожнього покриття гладкою кривою, яка проходить через середини вертикальних ліній відновлення стану.

Інший підхід полягає у використанні моделей математичного програмування. Golabi та ін. (1982) розробили комбіновану модель з прогнозуванням стану дорожнього одягу за допомогою ланцюгів Маркова та лінійного програмування (ЛП) з мінімізацією загальної вартості як цільової функції. Використання в цій моделі змінних «частка мережі» призводило до втрати інформації про місцезнаходження ділянок ремонту. Цей підхід був розширений і використаний Wang із співавторами (1993, 1994, 1995) та Liu (1996). Він був застосований в системах управління дорожнім одягом (PavementManagementSystem – PMS) в штатах Аляска, Канзас та в Португалії (Alviti із співавторами, 1994, Golabi, 2002). Grivas із співавторами (1993) представили модель ЛП для розподілу бюджетних коштів по періодам на мережевому рівні управління станом дорожнього одягу. Модель ЛП була

розроблена з урахуванням ефективної взаємодії економічних і технічних факторів.

Модель динамічного програмування (ДП) запропонована в 1987 р. U.S. Army Corps of Engineers в системі PAVER. Butt із співавторами (1987) застосували ланцюг Маркова в моделі ДП для прогнозування експлуатаційних якостей дорожнього одягу. Існують і інші формулювання задачі ДП.

Враховуючи той факт, що ремонт необхідний лише у певні моменти, можна дискретизувати плановий горизонт і сформулювати проблему ремонту як частково цілочисельну математичну модель [7].

Murakami та Turnquist (1985) використали динамічну модель, яка мінімізувала загальний показник погіршення стану системи при обмеженнях наявних ресурсів. Концепція вартості життєвого циклу не включена до їхньої оптимізаційної моделі.

Al-Subhi та ін. (1990) і Jacobs (1992) застосували подібну частково - цілочисельну математичну модель, щоб оптимізувати капітальний ремонт і заміну прогонової будовимоста. Jacobs спростив проблему частково-цілочисельного лінійного програмування приймаючи інтенсивність капітальних ремонтів, як константу і криву деградації як кусочно-лінійну функцію. Проте, насправді, нелінійності мають місце і в деградації об'єкту і в ефективності капітальних ремонтів [5]. Для розв'язання повністю цілочисельних та частково-цілочисельних задач використовується метод гілок та границь, запропонований в 1960 році A. Land та G. Doig [6].

Для багатокритеріальної оптимізації програм ремонтів використовується метод цільового програмування, вперше запропонований Charnes та ін. (1955) та застосований відносно доріг Sinha (1981), Ravirala та Grivas (1995). Метод використовує поняття мінімальної відстані від кращого випадку, це означає, що ідеальним рішенням було б мінімізувати зважену суму відхилень всіх цільових функцій від своїх цілей. Головним недоліком цієї технології є: (Zeleny 1982; Lee і Olson 1999): глобальна збіжність оптимальності не гарантується в деяких випадках; зважене цільове програмування і переважне цільове програмування може зробити неможливою оптимізацію рішень за Парето. Головні переваги цільового програмування: привабливість для приймаючого рішення для охоплення основних елементів проблеми і формулювання їх у цілі й обмеження; концептуальна простота розуміння і застосування.

Метод  $\epsilon$ -обмеження розглядає проблему з використанням методу скалярної оптимізації: оптимізація одного довільно вибраного об'єкту при перетворенні всіх інших об'єктів в обмеження, Haimes (1971) [2]. Цей підхід може полегшити обчислювальні труднощі, якщо мають неопуклі рішення (Goicoechea та ін. 1982).

Метод зважених сум був розроблений Davis та Campbell (1995), Wang (2003) [7]. Головна ідея методу - поєднання різних цільових функцій в одну цільову функцію шляхом присвоєння позитивної ваги для кожної з цільових функцій, і параметрично варійованих ваг для створення з його допомогою оптимальних за Парето рішень, як вперше запропонував Zadeh (1963). Основними недоліками цієї технології є: (Das та Dennis 1997 року; Miettinen 2001 року; Marler та Arora 2004): апріорний вибір ваги не обов'язково гарантує, що остаточне рішення буде прийнятним; декілька наборів ваги можуть генерувати туж саму за Парето оптимальну точку, і перехід від одного набору до іншого набору ваги може привести до пропуску Парето оптимальної точки; у разі неопуклості не можна отримати відповідний Парето оптимальний набір; послідовне і безперервне варіювання, не обов'язково призводить до рівномірного розподілу безлічі оптимальних за Парето точок. До основних переваг методу зважених сум належать: легкість розуміння, достатність для оптимальності за Парето, простота в реалізації; сумісність з різними алгоритмами включення переваг у будь-який апріорний або апостеріорний процес.

Запропоновано також використання: нечітких множин, генетичних алгоритмів Chan (2003), генетичні алгоритми разом компромісним програмуванням - Fwa (2000); генетичних алгоритмів з  $\epsilon$ -обмеженнями - Miyamoto (2000).

Генетичний алгоритм, засновником якого вважається John Holland, являє собою еволюційний алгоритм пошуку, що використовується для вирішення задач оптимізації та моделювання шляхом послідовного підбору, комбінування і варіації шуканих параметрів з використанням механізмів, що нагадують біологічну еволюцію. Цей алгоритм заснований на еволюційній теорії Дарвіна та на принципі «евристичного відбору». Особливістю генетичного алгоритму є акцент на використання оператора "схрещення", який виконує операцію рекомбінацію рішень-кандидатів. Основні переваги цього підходу: висока ефективність для складних задач комбінаторної оптимізації; потенційна

можливість сходимості на оптимум за Парето в цілому; застосування для неопуклих функцій; не накладає вимогу наявності градієнту, отже, є ефективним незалежно від характеру цільових функцій і обмежень. Однак, він також має ряд недоліків як з будь-яких евристичних методів: не завжди можна знайти справжнє оптимальне рішення; відносно висока обчислювальна вартість; досить висока складність програмування.

В Україні для обґрунтування програм капітальних і поточних ремонтів дорожніх одягів на основі мінімізації приведених дорожньо-транспортних затрат використовується Система управління станом покриття (СУСП), теоретичні основи якої було розроблено в роботах Кизими С.С., виконаних з 1970-х років до останнього часу [3]. Методи оптимального програмування для управління станом автомобільних доріг були розроблені в роботі [8].

**Постановка завдання.** Сформулювати задачу оптимізації програми дорожньо-ремонтних робіт для досягнення заданого стану дорожнього одягу на мережі доріг за задану кількість років як задачу з булевими змінними.

**Виклад основного матеріалу.** Проблему довготривалої оптимізації можна сформулювати як багатовимірну ранцеву модель [1].

Нехай  $I$  - це кількість секцій (ділянок) дорожнього покриття,  $T$  - кількість проміжків часу (років), і  $J$  - кількість альтернатив робіт, які необхідно провести в кожній секції у визначені проміжки часу,  $j = 1$  - нічого не робити. Нехай  $E_{ijt}$  - ефективність альтернативи  $j$  для секції  $i$  в проміжок часу  $t$ ,  $c_{ijt}$  - вартість альтернативи  $j$  для секції  $i$  в період  $t$ ,  $B_t$  - бюджет в періоді  $t$ ,  $N_{ij}$  - максимальна кількість разів використання альтернативи  $j$  протягом періоду планування,  $PQ_{it}$  - рівень якості дорожнього покриття в секції  $i$  на кінець планового періоду  $T$ ,  $\Delta_{pj}$  - відновлювальний ефект альтернативи  $j$ ,  $s$  - рівень якості покриття за якого секція дорожнього покриття вважається такою, що не потребує ремонту протягом даного періоду  $t$ ,  $m$  - мінімальний рівень якості дорожнього покриття,  $M$  - максимальний рівень якості дорожнього покриття. Значення змінної рішення  $X_{ijt}$  дорівнює 1, якщо альтернатива  $j$  для секції  $i$  в проміжок часу  $t$  призначена, і 0 якщо альтернатива  $j$  не призначена.  $A$  - сума секцій з потрібним рівнем стану на кінець планового періоду.

Проблема узгодження взаємопов'язаних стратегій в рамках фіксованого планового періоду і максимізації загального рівня якості дорожнього покриття доріг, з умови не перевищення наявного бюджету в кожному періоді, не

перевищення допустимої частоти робіт в рамках планового періоду з припущенням, що невикористані частини бюджету в певному періоді переходять в наступні періоди, може бути сформульована як багатовимірна 0-1 задача про ранець з альтернативним відбором та з пріоритетом техніко-економічних обмежень:

$$\max(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J E_{ijt} \times X_{ijt}) \quad (1)$$

Повинна виконуватись умова:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ijt} X_{ijt} \leq B_t, \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T X_{ijt} \leq N_{ij}, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ijt} = 1, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I i \geq A, \forall PQ_{i,T} \geq m, \quad (5)$$

$$PQ_{it} \geq s \Rightarrow \sum_{j=2}^J X_{ijt} = 0, \quad (6)$$

$$PQ_{i,t-1} + \sum_{j=1}^J \Delta p_j X_{ijt} \leq M, \quad (7)$$

$$X_{ijt} \in \{0,1\}. \quad (8)$$

Функція цілі (1) максимізує загальну ефективність системи. Бюджетні обмеження (2) визначають, що витрати на вибрані альтернативи не можуть перевищувати бюджет в кожному періоді. Обмеження (3) забезпечують те, що певні альтернативи на певних секціях дорожнього покриття не можуть застосовуватися частіше ніж це допустимо з технологічних причин в рамках планового періоду. Обмеження (4) змушує вибирати одну і тільки одну альтернативу для кожної секції в будь-який проміжок часу. Обмеження (5) використовується для відкидання будь-якої стратегії, яка не забезпечує потрібний мінімальний рівень якості дорожнього покриття на кінець планового періоду. Обмеження (6) забезпечує те, що секція дорожнього покриття не вважається такою, що потребує ремонту, якщо її стан кращий, ніж зумовлений в даний період. Обмеження (7) робить альтернативи неможливими, коли стан якості відновленого дорожнього покриття штучно більший ніж максимально можливий, і набір обмежень (8) відображає можливі значення змінних рішень. Існує три види обмежень, пов'язаних з цією проблемою: ресурси, вибір альтернативи та пріоритет техніко-економічних обмежень. Обмеження ресурсів включає в себе обмеження (2) та (3). Обмеження (4) - це обмеження вибору альтернативи. Обмеження (5) задає той необхідний стан дорожнього одягу всієї

мережі, який планується досягти. Обмеження (5), (6) та (7) стосуються пріоритетів техніко-економічних обмежень.

Задачу можна розв'язати за допомогою методу гілок та границь.

Щоб врахувати стохастичні особливості процесу деградації дорожнього одягу доцільно застосувати ймовірнісні моделі, засновані на моделях Маркова, Баєса і т.п.

### **Висновок**

Існує декілька методів математичного програмування для вирішення проблеми поступового приведення стану дорожнього одягу до нормативного рівня, проте всі вони потребують подальшого аналізу та удосконалення в напрямку врахування стохастичних факторів і умов невизначеності.

### **Література**

1. Jaewook Yoo. Multi-period optimization of pavement management systems. Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas University in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. Major Subject: Industrial Engineering. 2004. – 94 p.
2. Zheng Wu. Hybrid Multi-Objective Optimization Models for Managing Pavement Assets. Dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy In Civil and Environmental Engineering, Blacksburg, Virginia, 2008. – 203 p.
3. Кизима С.С. Наукові принципи та практичні напрямки управління станом автомобільних доріг / С.С. Кизима, О.П. Канін, М.М. Лихоступ // Сучасні проблеми та перспективи розвитку дорожньо-будівельного комплексу України. – К.: НТУ, 2004.
4. Yanfeng Ouyang, Samer Madanat. Optimal Scheduling of Rehabilitation Activities for Multiple Pavement Facilities. Department of Civil and Environmental Engineering Room 116, 114 McLaughlin Hall University of California, Berkeley. Submitted on July 28, 2002, for presentation only at the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003. – 29 p.
5. Chen, Xin, G. Claros, and W.R. Hudson (1992). Mixed-Integer Programming Model for AASHTO Flexible Pavement Design. *Transportation Research Record*, 1344, 139-147.
6. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций. Седьмое издание.: Пер. с англ. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
7. I.Y. Kim and O.L. de Weck. Adaptive weighted-sum method for bi-objective optimization: Pareto front generation. *Struct Multidisc Optim* 29, 149–158 (2005).
8. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.11 / В.Ф. Демішкан; Харк. держ. автомоб.-дорож. техн. ун-т. — Х., 2000. — 17 с.