

**УДК 625.7/.8:338**

**Ігнатюк В.В.**

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГРАМИ РЕМОНТІВ  
АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ**

**Анотація.** У статті розглянута можлива математична модель програми ремонтів автомобільних доріг для досягнення заданого стану дорожнього одягу на мережі доріг за задану кількість років.

**Ключові слова:** математична модель, дорожній одяг, методи оптимізації, програма робіт, стан доріг.

**Аннотация.** В статье рассмотрена возможная математическая модель программы ремонтов автомобильных дорог для достижения заданного состояния дорожной одежды на сети дорог за заданное количество лет.

**Ключевые слова:** математическая модель, дорожная одежда, методы оптимизации, программа работ, состояние дорог.

**Annotation.** In the article possibility of the mathematical model of the program of roads repairs work to achieve a given condition of pavement on the road network for a specified number of years.

**Keywords:** mathematical model, pavement, optimization techniques, programme of repairs control, the conditions of roads.

**Постановка проблеми.** Ефективність експлуатації автомобільного транспорту та безпека руху в значній мірі залежить від стану автомобільних доріг. Особливістю експлуатації автомобільних доріг на сучасному етапі розвитку дорожнього господарства є гострий дефіцит фінансових ресурсів [1]. За таких умов задача удосконалення управління станом автомобільних доріг набуває особливої актуальності. Обґрунтування програми ремонтів дорожніх одягів за допомогою математичних методів оптимізації актуальне, але являє собою складну техніко-економічну задачу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Програма робіт з ремонту доріг найчастіше розглядається як програма робіт з ремонту дорожнього одягу.

Систематичний оптимізаційний підхід в управлінні дорожнім одягом розвивається на протязі останніх кількох десятиріч у зв'язку з розробкою систем управління дорожнім одягом (англ. Pavement Management System – PMS, укр. Системи управління станом дорожнього покриття). Фундаментом для цих підходів є використання методів математичного програмування, які дозволяють, при виконанні певних умов, знайти найкраще (оптимальне) рішення.

Golabi та ін. (1982) розробили комбіновану модель, яка включає прогнозування стану дорожнього одягу за допомогою ланцюгів Маркова та мінімізацію загальних витрат методом лінійного програмування (ЛП). 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). Крім того він був застосований в системах управління дорожнім одягом в штатах Аляска, Канзас та в Португалії (Alviti із співавторами, 1994, Golabi, 2002). Grivas із співавторами (1993) запропонували модель ЛП для розподілу бюджетних коштів по періодах на мережевому рівні управління станом дорожнього одягу. Ця модель була розроблена з урахуванням ефективної взаємодії економічних і технічних факторів [2].

Враховуючи той факт, що ремонт необхідний лише у певні моменти, можна дискретизувати плановий горизонт і сформулювати проблему ремонту як частково - цілочисельну математичну модель [2].

Jacobs спростив проблему частково - цілочисельного лінійного програмування, приймаючи інтенсивність капітальних ремонтів, як константу

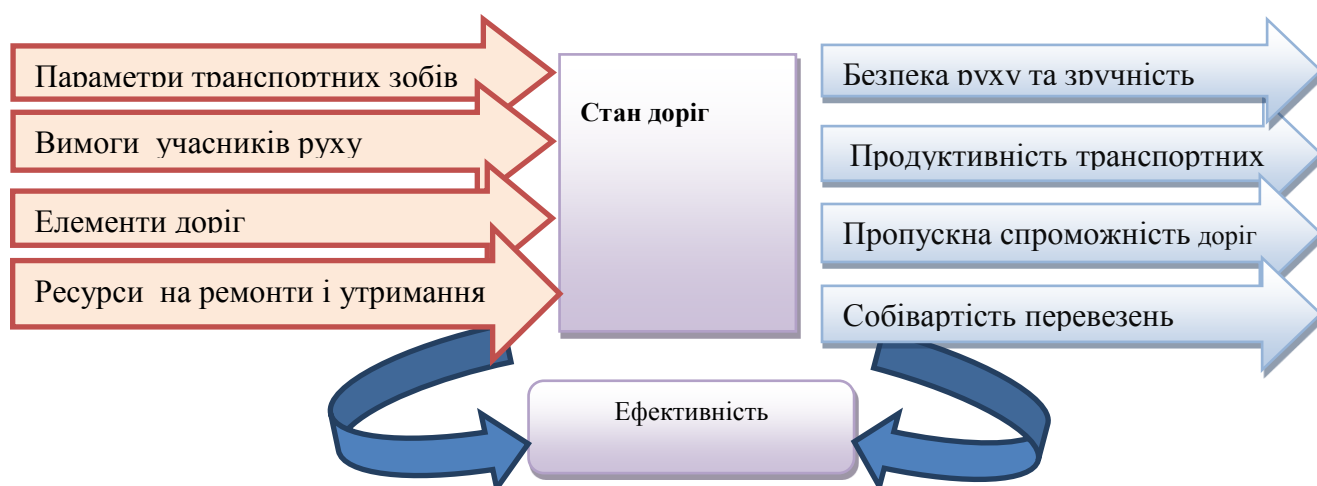
і криву деградації як кусочно-лінійну функцію. Проте, не лінійності мають місце і в деградації дорожнього одягу і в ефективності капітальних ремонтів [3]. Для розв'язання повністю цілочисельних та частково-цілочисельних задач використовується метод гілок та границь, запропонований в 1960 році А. Land та G. Doig [4].

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 може зробити неможливою оптимізацію рішень за Pareto.

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 [5]. Оптимізація програм ремонтів в СУСП здійснюється за критерієм мінімізації дорожньо-транспортних витрат на основі евристичного алгоритму. Алгоритм ґрунтується на пріоритетах ділянок доріг: в першу чергу, в програму ремонтів вибираються такі ділянки доріг, які мають найвищий коефіцієнт ефективності капітального ремонту, рівний відношенню різниці сумарних приведених середньорічних дорожньо-транспортних витрат так званої нульової стратегії (без подальших поточних відновлювальних ремонтів) і таких же витрат при різних можливих стратегіях подальших поточних ремонтів до витрат на ремонтні роботи. Методи оптимального програмування для управління станом автомобільних доріг були розроблені в роботі Демішкана В.Ф. [1].

**Виклад основного матеріалу.** Процес управління транспортно-експлуатаційним станом автомобільних доріг є складовою частиною взаємодії більш складної (ієрархічної) за структурою автомобільно-дорожньої системи, головними елементами якої є на вході: параметри автомобілів, елементи доріг, вимоги з боку учасників руху, ресурси на ремонт і утримання, а кінцевим продуктом їх взаємодії є зручність і безпека руху, продуктивність

транспортних засобів, пропускна і провізна спроможність доріг, собівартість перевезень (рис.1).



**Рисунок 1** – Головні елементи автомобільно-дорожньої системи

У процесі функціонування автомобільно-дорожньої системи є широкі можливості переведення її з одного стану в інший при використанні відповідних управляючих впливів на окремі елементи (наприклад, на транспортно-експлуатаційний стан доріг, на розподіл транспортних потоків по мережі доріг, на інтенсивність і склад транспортного потоку) або одночасно на сукупність елементів системи. У всіх випадках одним з основних критеріїв вибору керуючого впливу на систему і прийняття керуючого рішення є економічна ефективність функціонування автомобільно-дорожньої системи, яка робить вирішальний вплив на собівартість автомобільних перевезень.

Особливостями функціонування автомобільно-дорожньої системи є її випадковий характер і децентралізація взаємодії елементів системи; система включає численні самостійно діючі елементи, що піддаються керуючим рішенням і діям, прийнятим ізольовано один від одного. Випадковий характер функціонування системи обумовлений, зокрема, значним несприятливим впливом імовірнісних факторів клімату на дорожні умови і ймовірнісної природою формування і руху транспортних потоків.

Фактичний експлуатаційний стан дороги, являє собою результат двох протилежних процесів :

- процесу розвитку пошкоджень елементів доріг;
- процесу ліквідації пошкоджень шляхом виконання робіт з ремонту та утримання доріг.

Проблему довготривалої оптимізації можна сформулювати як багатовимірну задачу дискретної оптимізації.

Нехай  $I$  - це кількість секцій (ділянок) дорожнього одягу,  $T$  – тривалість планового періоду (років),  $J$  – кількість альтернатив робіт, які необхідно провести в кожній секції у визначені проміжки часу. 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 одягу в секції  $i$  на кінець планового періоду  $T$ ;  $\Delta p_j$  – відновлювальний ефект альтернативи  $j$ ;  $s$  – рівень якості одягу, за якого секція дорожнього покриття вважається такою, що не потребує ремонту протягом даного періоду  $t$ ;  $m$ ,  $M$  – мінімальний та максимальний рівні якості дорожнього одягу. 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 одягу, 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:

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

Повинні виконуватись умови:

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

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

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

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

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

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

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

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.

Для відновлення стану мережі автомобільних доріг до заданого стану застосуємо метод імітаційного моделювання, що полягає в розробці програмного алгоритму процесу функціонування мережі автомобільних доріг з ймовірністю потреби в ремонтах.

Імітаційне моделювання визначається як експериментування з моделлю реальної системи. Необхідність вирішення задачі шляхом експериментування стає очевидною, коли виникає потреба отримати про систему специфічну інформацію дослідницького характеру.

Алгоритми оптимізації стратегій ремонтів автомобільних доріг складаються з двох головних модулів – модулю деградації елементів дороги і модулю оптимізації стратегії ремонтів за одним або багатьма (звичайно двома) критеріями, причому в останньому випадку частіш за все знаходиться оптимальне за Парето рішення [10] за критерієм стану доріг і витрат на ремонти.

Для пошуку оптимального рішення задачі можна застосувати генетичний алгоритм [6-9] з детермінованими моделями деградації дорожнього одягу (за міцністю, рівністю та зчепленням), які використовуються в СУСП.

Погіршення якостей дорожнього одягу описується окремими коефіцієнтами, частина з яких є важко спостереженими. Інтенсивність руху і зміну природних умов з часом важко спрогнозувати. Це робить експлуатаційні якості або погіршення дорожнього одягу варіативним показником, що ґрунтується на наборі сумнівних або випадкових особливостей. До того ж невпевненість може бути результатом інспекції або процесу вимірювання факторів, щоб визначити кількість коефіцієнтів, які впливають на процес деградації, і моделювати істинний процес деградації матеріалів. Тому процес деградації дорожнього одягу є стохастичним. Більшість з запропонованих моделей імовірності засновані на моделюванні процесів на основі ланцюга Маркова - спеціального стохастичного процесу дискретного типу, де стан системи (наприклад стан дорожнього одягу)  $X_t$  в  $t + 1$  часі залежить від стану системи  $X_t$  в якомусь попередньому  $t$  часі, але не залежить від того, який стан системи  $X_t$  був отриманий [10].

Одна з головних проблем, що зустрічаються в існуючих моделях вірогідності, - це складність в створенні матриць вірогідності переходу (TRMs). TRM є квадратною матрицею  $s \times s$ , де  $s$  є числом можливих станів в системі. Матриця містить вірогідність переходу від значення стану  $i$  до стану  $j$ , тобто, невелика вірогідність, що явище перебуватиме в одному стані, а потім перейде в інший через фіксований інтервал часу. TRM може створюватися, використовуючи історичні дані або суб'єктивні думки досвідчених інженерів через індивідуальні інтерв'ю і анкети, які займають багато часу і витрат.

Процес здійснення проектів програми – динамічний, стохастичний і невизначений по самій своїй природі, тобто ризикований. Наприклад, перспективна інтенсивність та склад руху залежать від багатьох факторів ризику – розвитку економіки, рівня автомобілізації та інших важко прогнозованих параметрів. Для оптимізації процесу виконання програми робіт та урахування дії на дорожній одяг випадкових факторів доцільно застосувати імітаційну модель з імітацією випадкових подій і величин методом Монте-Карло.

## Висновки

У зв'язку з обмеженим фінансуванням дорожньої галузі проблема оптимізації програми приведення стану дорожнього одягу до нормативного рівня за певну кількість років є актуальною. Для урахування дії на дорожній одяг і процес виконання програми робіт невизначеності і випадкових факторів доцільно застосувати імітаційну модель з імітацією випадкових подій і величин методом Монте-Карло.

## Література

1. Демишкан В.Ф. Усовершенствование управления состоянием автодорог в условиях ограниченных ресурсов : дис. канд. техн. наук: 05.22.11 / В.Ф. Демишкан; Харк. держ. автомоб.-дорож. техн. ун-т. — Х., 2000. — 168 с.
2. I.Y. Kim and O.L. de Weck .Adaptive weighted-sum method for bi-objective optimization: Pareto front generation,pp.149-153.
3. Chen, Xin, G. Claros, and W.R. Hudson (1992). Mixed-Integer Programming Model for AASHTO Flexible Pavement Design. Transportation Research Record, 1344, 139-147.
4. Хеми А. Таха. Введение в исследование операций. Седьмое издание. Издательский дом «Вильямс», 2005. – 428 с.
5. 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.
6. Fwa TF, Sinha KC and Reversion JDN Highway Routine Maintenance Programming at Networking Level / Journal of Transportation Engineering. ASCE 1988;114 (5):539-54.
7. Jaewook Yoo. Multi-period optimization of Pavement Management Systems / Jaewook Yoo - Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2004 – 104 p.
8. Maintenance optimization of infrastructure networks using genetic algorithms / G. Morcou, Z. Lounis, Automation in Construction 14 (2005) 129– 142.
9. Review of Application of Genetic Algorithms in Optimization of Flexible Pavement Maintenance and Rehabilitation in Nigeria / Clarkson Uka CHIKEZIE, Adekunle Taiwo OLOWOSULU, Olugbenga Samuel ABEJIDE, Baba A. KOLO. World J of Engineering and Pure and Applied Sci. 2011;1(3), pp. 68-76.
10. Maintenance optimization of infrastructure networks using genetic algorithms. // G. Morcou, Z. Lounis, Automation in Construction 14 (2005) 129– 142.