

УДК 519.873

*А.І. СІДЛЯРЕНКО*, асп., Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

## **МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ КОМПЛЕКСУ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ У ДОРОЖНЬОМУ ПОКРИТТІ ТА ПРИДОРОЖНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ**

Подолання проблеми якості дорожнього покриття можливе за умов системного впровадження засобів та методів моніторингу та контролю його стану. Запропоновано математичну модель задачі оптимізації комплексу методів неруйнівного контролю для виявлення дефектів (пошкоджень) у дорожньому покритті та придорожній інфраструктурі. Лл.: 1. Бібліогр.: 16 назв.

**Ключові слова:** комплекс методів неруйнівного контролю, дорожнє покриття, придорожня інфраструктура, оптимізація.

**Постановка проблеми та аналіз літератури.** Транспорт, транспортні артерії та придорожня інфраструктура в розвинених країнах світу, як відомо, відноситься до так званої критичної інфраструктури держави [1, 2]. Проблемами забезпечення нормального функціонування транспортної критичної інфраструктури є безпека на транспорті, безпека руху на магістральних дорогах та мінімізація дорожньо-транспортних пригод (ДТП), забезпечення якості дорожнього полотна та стабільної пропускної спроможності доріг, інформатизація транспортних коридорів та мереж автомобільних доріг різного призначення. Однією з пріоритетних задач державної цільової програми розвитку автомобільного транспорту визначається будівництво придорожньої інфраструктури, підвищення якості автомобільних доріг та забезпечення безпеки руху [3]. Підвищення рівня безпеки за рахунок подолання проблеми якості дорожнього покриття можливе за умов системного впровадження засобів та методів моніторингу та контролю його стану, своєчасного ремонту автодорожнього покриття та споруд придорожньої інфраструктури, інформаційного супроводження процесів підтримки та прийняття раціональних управлінських рішень [4 – 6].

Роботи науковців в основному направлені на дослідження проблеми неруйнівного контролю одним методом або однією групою методів [4, 7 – 10]. Наприклад в [7] пропонується використовувати для неруйнівного контролю модуль пружності, товщини та якості ущільнення асфальтобетонного шару, метод спектрального аналізу поверхневих

хвиль. В якості інформативної характеристики за цим методом використовують параметри розповсюдження поверхневої хвилі Релея, що генерується під дією тестового імпульсного навантаження.

В роботі [9] розглянуто динамічні моделі коливання дорожнього одягу. Досліджено можливість оцінки динамічного модуля конструкції дороги у формі необмеженої смуги на пружній основі. Представлена діагностична таблиця, що встановлює зв'язок модуля конструкції і пружних переміщень під дією рухомого автотранспорту.

Отже, можна зробити висновок, що використання окремих методів неруйнівного контролю (МНК) дає певні результати виявлення окремих пошкоджень, із своїми перевагами та недоліками [5, 11], які можуть не відповідати дійсному стану об'єкта дослідження через не повне відображення наявних пошкоджень. Разом з тим, наприклад, застосування методів візуального контролю для дорожнього покриття дає можливість оперативно виявити поверхневі пошкодження, але не дозволяє визначити руйнування чи деформацію нижніх шарів дорожнього одягу, що може стати причиною необ'єктивного аналізу ділянки дороги, а результати усунення таких пошкоджень швидко будуть знівельовані та повернуть ділянку до попереднього стану або погіршать.

Одночасне застосування різних за своєю природою МНК, як показує практика їх використання при дослідженні складних систем, дає можливість значно прискорити та підвищити ймовірність виявлення дефектів, отримати повну та об'єктивну інформацію про експлуатаційний стан і ступінь відповідності фактичного стану об'єкта контролю, його параметрів і характеристик вимогам безпеки руху. МНК дозволяють досліджувати стан елементів дорожньої інфраструктури, не виводячи їх з експлуатації, а накопичені статистичні дані по виявлених пошкодженнях використані при усуненні пошкоджень та можливих помилок при повторному проведенні контролю [5, 11, 12].

Питання інформатизації використання МНК в дорожньому господарстві набуває особливої актуальності завдяки Державній науково-технічній програмі "Ресурс" № 1331 [13] та визначеним Наказом Мінрегіонбуду України порядком проведення технічного обстеження будівельних конструкцій та інженерних мереж [14].

В роботі пропонується комплексувати різнотипні МНК, наприклад такі як ґрунтопроникаючий радар, метод ультразвукових хвиль, ударного імпульсу, метод відриву зі сколюванням та ін., для визначення оптимального комплексу МНК.

**Мета статті** – розробити математичну оптимізаційну модель комплексування різнотипних МНК для виявлення комбінацій пошкоджень у дорожніх покриттях та придорожній інфраструктурі.

**Постановка задачі формування комплексу різнотипних МНК.**

Нехай  $H = \{h_i, i \in I = \{1, 2, \dots, i^*\}\}$  – скінчена множина типів пошкоджень (дефектів), які можливі на ділянках дорожнього покриття та елементах дорожньої інфраструктури (міст, шляхопровід, тунель тощо), де  $I$  – множина індексів типів пошкоджень. Пошкодження  $h_i \in H$  характеризуються різними показниками такими, як, наприклад, геометричні показники (глибина та довжина тріщини, рівність дорожнього одягу), важкість усунення, можливість скоєння ДТП та ін. [5].

Для діагностики пошкоджень  $h_i \in H$  використовуються різні МНК або їх типи (способи реалізації МНК), які характеризуються різними ймовірностями виявлення пошкоджень та витрат ресурсів. Наприклад, якість проведення візуального контролю залежить від рівня підготовки спеціалістів, які можуть оцінити ступінь пошкоженості верхнього шару дорожнього покриття, нерівності дорожнього покриття та елементів конструкцій штучних споруд, якість асфальтобетону та ін. Такий МНК можна вважати найоперативнішим та найдешевшим порівняно з іншими, які потребують тривалих лабораторних досліджень та коштовної спецтехніки. Ще одним типом буде моніторинг стану дорожнього покриття та елементів дорожньої інфраструктури за допомогою космічних систем, але він також потребує додаткового технічного оснащення та навчання персоналу.

Позначимо  $M_j = \{m_{jk}\}$  – множину МНК  $j$ -го типу, де  $j \in J$  – множина індексів типів МНК,  $k \in K_j \subseteq K$  – множина індексів модифікацій (способів реалізації) типів МНК. На рис. 1. зображена спрощена схема взаємозв'язку різнотипних МНК для виявлення деякого пошкодження  $h_i \in H$ .

Позначимо  $p(m_{jk})$  – апріорне значення ймовірності виявлення пошкодження методом  $m_{jk}$ . Значення ймовірностей  $p(m_{jk})$  виявлення різних типів пошкоджень задаються в технічній документації приладів, визначаються на основі експериментальних досліджень, або відомі з аналогічних досліджень. Множина  $R_i$  альтернативних технологій

виявлення пошкодження  $h_i \in H$ ,  $i \in I$  комплексом МНК задається наступним чином:

$$R_i = \{r_i^1 = \{j_1^1, \dots, j_{s_1}^1\}, \dots, r_i^{r_i} = \{j_1^{r_i}, \dots, j_{s_{r_i}}^{r_i}\}\},$$

$$j_1^1, \dots, j_{s_1}^1, \dots, j_1^{r_i}, \dots, j_{s_{r_i}}^{r_i} \in J_i,$$

де елементами множини  $R_i$  є сполучення індексів  $j_1, \dots, j_s \in J_i \subseteq J$  множин  $M_{j_1}, \dots, M_{j_s}$  різнотипних МНК, які задають фіксовану технологію виявлення пошкоджень. Таким чином, сполучення  $r_i = \{j_1, \dots, j_s\} \in R_i$  – це фіксована технологія виявлення пошкодження  $h_i \in H$ , в якій задіяні певні типи МНК, і яка враховує як специфіку ділянки, яка досліджується, так і прилади, які застосовуються для проведення неруйнівного контролю та можливості їх спільного використання.

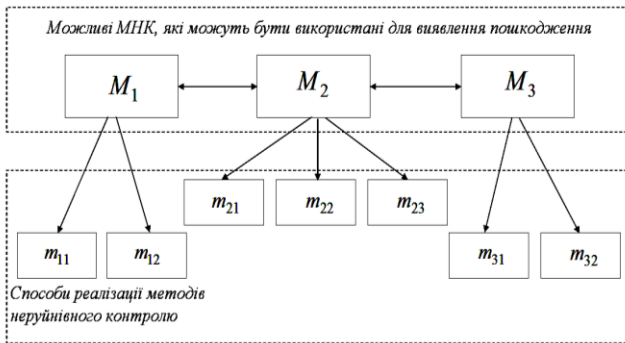


Рис. 1. Схема способу побудови комплексу МНК

Кожна технологія  $r_i \in R_i$  представляється можливими варіантами типів МНК (комплексом МНК)  $v_{r_i} = (m_{j_1 k}^i, \dots, m_{j_s k}^i) \equiv (m_{j k})_{j \in r_i}$ , який застосовується для виявлення пошкодження  $h_i \in H$ .

Множина  $V_{r_i} = \prod_{j \in r_i} M_j$  – множина можливих варіантів  $v_{r_i}$  реалізації технології  $r_i \in R_i$ ;  $V_i = \bigcup_{r_i \in R_i} V_{r_i}$  – множина всіх альтернативних

комплексів МНК для виявлення пошкодження  $h_i \in H$ ;  $V = \prod_{i \in I} V_i$  – множина альтернативних комплексів МНК  $v = (v_{r_1}, \dots, v_{r_i}, \dots, v_{r_*}) \equiv (v_{r_i})_{i \in I}$ ,  $v_{r_i} \in V_i, i \in I$ ,  $v \in V = \prod_{i \in I} V_i$  для виявлення всіх пошкоджень  $h_i \in H$ .

Імовірність невиникнення аварійної ситуації в об'єктах контролю після виявлення і усунення пошкодження  $h_i \in H$  визначається так [15]

$$P_i(p(v_{r_i})) = 1 - p(v_{r_i}), \quad (1)$$

де  $p(v_{r_i}) = 1 - \prod_{j \in J_i} (1 - p(m_{jk}))$  – імовірність виявлення пошкодження  $h_i \in H$  при застосуванні комплекту  $v_{r_i}$  для технології  $r_i$ .

Якщо розглядати задачу виявлення одночасно всіх пошкоджень з множини пошкоджень  $H$  і припустити, що  $h_i \in H$  відомі та для їх виявлення використовуються різні комплекти  $v_{r_i} \in V_i$ , то (1) виглядатиме

$$P_H(v) = \prod_{i \in I} p(v_{r_i}). \quad (2)$$

Значення  $P_H(v)$  є нижньою оцінкою імовірності виявлення множини пошкоджень  $H$  і може використовуватись як критерій при виборі МНК для одночасного виявлення всіх пошкоджень  $h_i \in H$ .

Нехай на реалізацію методів неруйнівного контролю (закупку приладів, розробку методології, навчання людей тощо) виділено кошти у розмірі  $C_0$ , тоді задача формування комплексу МНК матиме вигляд:

$$P_H(v) = \prod_{i \in I} p(v_{r_i}) \rightarrow \max, \quad (3)$$

$$C(v) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ji}(v_{r_i}) \leq C_0, \quad (4)$$

$$v \equiv (v_{r_i})_{i \in I}, v_{r_i} = (m_{j_1 k}^i, \dots, m_{j_{s_k}^i}) \in V_i, k \in K_j \subseteq K, v \in V = \prod_{i \in I} V_i, \quad (5)$$

де  $c_{ji}$  – обсяг фінансування, що необхідний для реалізації варіанту  $v_{r_i}$ .

Задача (3) – (5) є задачею дискретного програмування з багатьма обмеженнями, для розв'язання якої можуть використовуватись алгоритми послідовного аналізу варіантів та наближені методи [16]. Результатом розв'язку задачі є комплекс різнотипних МНК

$v^* = (v_{r_1}^*, \dots, v_{r_i}^*, \dots, v_{r_i^*}^*)$ , де  $v_{r_i}^* = (m_{j_1 i}, \dots, m_{j_s i})$ , значення ресурсів  $C(v^*)$  та

значення ймовірності  $P_H(v^*)$ .

Наприклад, розглянемо мостову конструкцію. Об'єктами, до яких будуть застосовані МНК будуть асфальтобетон, залізобетонні конструкції, місця сварки, інші складові. Для виявлення множини пошкоджень  $H$  в мостовій конструкції можемо використовувати радіохвильові МНК ( $M_1 = \{m_{1k}\}$ ,  $k \in K_1$ ), акустичні МНК ( $M_2 = \{m_{2k}\}$ ,  $k \in K_2$ ), методи радіоскопії ( $M_3 = \{m_{3k}\}$ ,  $k \in K_3$ ), методи візуального контролю ( $M_4 = \{m_{4k}\}$ ,  $k \in K_4$ ). Тоді у результаті розв'язку цієї задачі кожний комплект  $v_{r_i}^*$  матиме вигляд  $v_{r_i}^* = (m_{1k_1}, m_{2k_2}, m_{3k_3}, m_{4k_4})$ , де  $k_1 \in K_1 \subseteq K$ ,  $k_2 \in K_2 \subseteq K$ ,  $k_3 \in K_3 \subseteq K$ ,  $k_4 \in K_4 \subseteq K$  – вибрані  $k$ -ті модифікації відповідних МНК для виявлення  $i$ -го дефекту.

Способи удосконалення моделі можуть бути отримані шляхом додаткової оцінки критичності дефектів та критичності частин конструкції, на якій застосовуються МНК, або шляхом спрощення вибору комплексу МНК для окремих частин конструкції, що не потребують комплексного підходу.

**Висновки.** Розглянута постановка задачі неруйнівного контролю полягає в виборі МНК у випадку, коли необхідно виявити одночасно всю множину пошкоджень  $H$ . Оцінкою якості виявлення пошкоджень є показник  $P_H(v)$ , який сформований у критерії (2).

Інформація про пошкодження та їх розташування є вхідними даними для баз даних та систем прийняття рішень інформаційного супроводження даних об'єктів.

**Список літератури:** 1. *Uniting and strengthening America by providing appropriate tools required to intercept and obstruct terrorism (USA PATRIOT ACT, 2001)*. – Режим доступу: <http://frwebgate.access.gpo.gov/> (27.02.13). – Назва з екрану. 2. *European programme for critical infrastructure protection (COM/2006/786 final)*. – Режим доступу: <http://eur-lex.europa.eu/> (05.03.13). – Назва з екрану. 3. *Прейгер Д.К.* Реалізація потенціалу транспортної інфраструктури України в стратегії посткризового економічного розвитку / Д.К. Прейгер, О.В. Собкевич, О.Ю. Ємельянова. – К.: НІСД, 2011. – 37 с. 4. *Семеген М.М.* Визначення напружено-деформованого стану трубопроводів на ремонтних ділянках / М.М. Семеген, З.П. Лютак // *Методи та приклади контролю якості*. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. – № 21 – С. 43-47. 5. *Non-destructive measurement of pavement layer thickness. Final report*. – California Department of transportation, 2003. – 108 р. 6. *Бірюков Д.С.* Розвиток і впровадження інформаційно-аналітичного забезпечення в сфері керування автодорожнім господарством регіонів / Д.С. Бірюков, В.А. Заславський, А.І. Сідляренко // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. – Луганськ, 2012. – № 8 (179). – Ч.2. – С. 10-16. 7. *Кіяшко І.В.* Контроль якості влаштування

асфальтобетонних шарів дорожнього одягу неруйнівним методом / *I.B. Кіяшко, Д.М. Новаковський, О.Ю. Пархоменко* // Автошляховик України. – 2009. – № 5. – С. 32-34.

**8.** *Овчинников С.Л.* Об обратной задаче волновой диагностики дорожных покрытий / *С.Л. Овчинников, С.Ю. Романов* // Труды международной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ'2009). – ЮУрГУ, Челябинск, 2009 – С. 624-630. **9.** *Кычкин В.И.* Неразрушающий динамический метод контроля дорожных одежд / *В.И. Кычкин, В.С. Юшков* // Интернет-журнал "Науковедение". – М.: 2013. – № 1 (14). – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/sbornik14/34tvn113.pdf>. **10.** *Макачев А.Ю.* Оценка технического состояния улично-дорожной сети городов адеквативными методами / *А.Ю. Макачев, Н.А. Луишиков* // Научно-технический сборник "Коммунальное хозяйство городов". Серия "Технические науки". – Харьков, 2003. – Вып.49. – С. 334-337.

**11.** *Неразрушающий контроль* и диагностика. Справочник / *Под ред. В.В. Клюева.* – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с. **12.** *Заславский В.А.* Роль и место методов неразрушающего контроля для обеспечения надежности и долговечности сложных систем с высокой ценой отказа / *В.А. Заславский, И.Н. Каденко* // Неразрушающий контроль. – 1999. – № 1. – С. 15-22. **13.** *Постанова* Кабінету Міністрів України від 08.10.2004 р. №1331 "Про затвердження Державної науково-технічної програми "Ресурс". – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0830-11> (04.02.13). – Назва з екрану. **14.** *Наказ* Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства від 24.06.2011 р. №91 "Про затвердження Порядку прийняття в експлуатацію індивідуальних (садибних) житлових будинків, садових, дачних будинків, господарських (присадибних) будівель і споруд, прибудов до них, громадських будинків I та II категорій складності, які збудовані без дозволу на виконання будівельних робіт, і проведення технічного обстеження їх будівельних конструкцій та інженерних мереж". – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0830-11> (06.03.13). – Назва з екрану. **15.** *Девис Д.* Вычислительные сети и сетевые протоколы / *Д. Девис, Д. Барбер, Ч. Прайс, С. Соломодинес.* – М.: Мир, 1982. – 562 с. **16.** *Волкович В.Л.* Модели и методы оптимизации надежности сложных систем / *В.Л. Волкович, А.Ф. Волошин, В.А. Заславский, И.А. Ушаков.* – К.: Наук. думка, 1993. – 312 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Uniting and strengthening America by providing appropriate tools required to intercept and obstruct terrorism (USA PATRIOT ACT, 2001). – Rezhim dostupu: <http://frwebgate.access.gpo.gov/> (27.02.13). – Nazva z ekranu. **2.** European programme for critical infrastructure protection (COM/2006/786 final). – Rezhim dostupu: <http://eur-lex.europa.eu/> (05.03.13). – Nazva z ekranu. **3.** *Prejger D.K.* Realizacija potencialu transportnoї infrastrukturi Ukraїni v strategii postkrizovogo ekonomichnogo rozvitku / *D.K. Prejger, O.V. Sobkevich, O.Ju. Emel'janova.* – K.: NISD, 2011. – 37 s. **4.** *Semegen M.M.* Vznachennja napruzhenno-deformovanogo stanu truboprovodiv na remontnih diljankah / *M.M. Semegen, Z.P. Ljutak* // Metodi ta prikladi kontrolju yakosti. – Ivano-Frankivs'k: IFNTUNG, 2008. – № 21 – S. 43-47. **5.** Non-destructive measurement of pavement layer thickness. Final report. – California Department of transportation, 2003. – 108 p. **6.** *Birjukov D.S.* Rozvitok i vprovadzhenja informacijno-analitchnogo zabezpechennja v sferi keruvannja avtodorozhnim gospodarstvom regioniv / *D.S. Birjukov, V.A. Zaslavs'kij, A.I. Sidljarenko* // Visnik Shidnoukraїns'kogo nacional'no universitetu imeni Volodimira Dalja. – Lugans'k, 2012. – № 8 (179). – Ch.2. – S. 10-16. **7.** *Kijashko I.V.* Kontrol' yakosti vshluchuvannja asfal'tobetonnih shariv dorozhn'ogo odjagu nerujnivnim metodom / *I.V. Kijashko, D.M. Novakovskij, O.Ju. Parhomenko* // Avtoshljahovik Ukraїni. – 2009. – № 5. – S. 32-34. **8.** *Ovchinnikov S.L.* Ob obratnoj zadache volnovoj diagnostiki dorozhnyh pokritij / *S.L. Ovchinnikov, S.Ju. Romanov* // Trudy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Parallel'nye vychislitel'nye tehnologi" (PaVT'2009). – JuUrGU, Cheljabinsk, 2009 – S. 624-630. **9.** *Kychkin V.I.* Nerazrushajushhij dinamicheskij metod kontrolja dorozhnyh odezhd / *V.I. Kychkin, V.S. Jushkov* // Internet-zhurnal

"Naukovedenie". – M.: 2013. – № 1 (14). – Rezhim dostupa: <http://naukovedenie.ru/sbornik14/34tvn113.pdf>. **10.** Makachev A.Ju. Ocenka tehničkog sostojanija ulično-dorozhnoj seti gorodov adestruktivnymi metodami / A.Ju. Makachev, N.A. Lushnikov // Nauchno-tehnički sbornik "Kommunal'noe hozjajstvo gorodov". Serija "Tehničke nauki". – Har'kov, 2003. – Vyp.49. – S. 334-337. **11.** Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika. Spravochnik / Pod red. V.V. Kljueva. – M.: Mashinostroenie, 1995. – 488 s. **12.** Zaslavskij V.A. Rol' i mesto metodov nerazrushajushhego kontrolja dlja obespečenija nadezhnosti i dolgovečnosti slozhnyh sistem s vysokoj cenoj otkaza / V.A. Zaslavskij, I.N. Kadenko // Nerazrushajushhij kontrol'. – 1999. – № 1. – S. 15-22. **13.** Postanovna Kabinetu Ministriv Ukraïni vid 08.10.2004 r. № 1331 "Pro zatverdzhennja Derzhavnoj nauko-tehničnoj programi "Resurs". – Rezhim dostupu: <http://uazakon.com/document/fpart61/idx61712.htm> (04.02.13). – Nazva z ekranu. **14.** Nakaz Ministerstva regional'nogo rozvitku, budivnictva ta zhitlovo-komunal'nogo gospodarstva vid 24.06.2011 r. № 91 "Pro zatverdzhennja Porjadku priijnattja v ekspluataciju individual'nih (sadibnih) zhitlovih budinkiv, sadovih, dachnih budinkiv, gospodars'kih (prisadibnih) budivel' i sporud, pribudov do nih, gromads'kih budinkiv I ta II kategorij skladnosti, jaki zbudovani bez dozvolu na vikonannja budivel'nih robit, i provedennja tehničnogo obstezhennja ih budivel'nih konstrukcij ta inženernih mrežh". – Rezhim dostupu: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0830-11> (06.03.13). – Nazva z ekranu. **15.** Devis D. Vychislitel'nye seti i setevye protokoly / D. Devis, D. Barber, Ch. Prajs, S. Solomodines. – M.: Mir, 1982. – 562 s. **16.** Volkovich V.L. Modeli i metody optimizacii nadezhnosti slozhnyh sistem / V.L. Volkovich, A.F. Voloshin, V.A. Zaslavskij, I.A. Ushakov. – K.: Nauk. dumka, 1993. – 312 s.

*Статью представил д-р техн. наук, проф. кафедри математичної інформатики Київського національного університету ім. Тараса Шевченка Заславський В.А.*

*Надійшла (received) 25.03.2014*

Sidliarenko Andrii, Lead Engineer  
Taras Shevchenko national university of Kyiv  
Str. Volodymyrska, 60, Kyiv, Ukraine, 01601  
Tel.: (050) 380-59-87, e-mail: [sidljarenko@gmail.com](mailto:sidljarenko@gmail.com)  
ORCID ID: 0000-0002-5130-7657