

УДК 504:625.7

Рутковська І. А.¹, канд. техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0001-7832-4222>Ярошук О. С.², <https://orcid.org/0000-0003-1550-0131>¹Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна²Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ВПРОДОВЖ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ

Анотація

Вступ. Мережа автомобільних доріг є ключовою складовою інфраструктури, яка надає багато можливостей та зручностей, дозволяє долати великі відстані для постачання товарів, перевезення людей. Від безперебійного пересування транспорту автомобільними дорогами залежить комфорт і добробут населення в різних місцях і віддалених куточках країни. Нажаль з плином часу та різних зовнішніх факторів конструкції автомобільних доріг зазнають руйнувань і потребують відновлення для збільшення тривалості їх терміну експлуатації.

Проблематика. Поряд із численними перевагами функціонування та розвиток мережі автомобільних доріг супроводжується негативним впливом на довкілля на всіх етапах життєвого циклу. З часом відбувається вплив кліматичних умов та зростаюче навантаження на конструкції автомобільних доріг, в результаті чого дорожній покрив зношується, руйнується і потребує ремонтування під час експлуатаційного утримування. Для проведення дорожніх робіт під час капітального ремонтування або реконструювання необхідно залучати багато техніки та великі об'єми матеріалів.

Мета. Виникає необхідність у пошуку нових наукових підходів та методів досліджень в напрямку мінімізації використання природних ресурсів, впливу на довкілля, який відбувається впродовж життєвого циклу автомобільної дороги.

Матеріали та методи. У статті запропоновано застосування методу системного аналізу. Цей метод допомагає комплексно оцінити стан існуючої автомобільної дороги, визначити оптимальні технології ремонту, забезпечити ефективне використання ресурсів, мінімізуючи економічні витрати, а також вплив на довкілля.

Результати. Узагальнені і систематизовані кілька відомих та нових методів системного аналізу в сучасних умовах та наведена перспектива їх комплексного використання в процесі дослідження життєвого циклу автомобільної дороги.

Висновки. Запропонований системний підхід дозволить виконувати оброблення великого обсягу даних, враховувати взаємозв'язані параметри і комплексно розглядати різні варіанти влаштування конструкцій автомобільних доріг, виконувати дорожні роботи з мінімальними витратами та впливом на довкілля.

Ключові слова: автомобільна дорога, будівельні матеріали, вплив на довкілля, дорожні роботи, життєвий цикл автомобільної дороги, забруднення атмосферного повітря, конструкція дорожнього одягу, системний аналіз.

Вступ

Методи системного аналізу надають можливість кількісного порівняння варіантів досліджуваних систем з врахуванням технічних, економічних та екологічних чинників [1].

Основні етапи системного аналізу:

- встановлення чітких цілей та завдань, які потрібно досягти в процесі аналізу;
- створення математичних або концептуальних моделей, що описують структуру та функціонування системи;
- збір необхідної інформації про систему та її компоненти;

- обробка та аналіз зібраних даних для виявлення закономірностей та взаємозв'язків;
- розгляд різних варіантів вирішення проблеми та їх оцінка з точки зору ефективності та ризиків;

- вибір найкращого варіанту вирішення проблеми на основі проведення аналізу;
- реалізація обраного рішення та моніторинг його виконання.

Життєвий цикл конструкції автомобільної дороги охоплює найважливіші етапи: планування, проектування, будування, експлуатування, капітальне ремонтування або реконструювання та ліквідування. На всіх етапах життєвого циклу автомобільної дороги відбуваються впливи на довкілля. Однак на кожному з етапів можливо передбачити заходи зменшення цих впливів.

Вплив на довкілля відбувається ще на етапі виробництва та видобування будівельних матеріалів. Під час планувальних і проєктувальних робіт фахівці замислюються звідки і яким чином буде виконуватись транспортування матеріалів на ділянку будування. Під час перевезення матеріалів на ділянку будування відбуваються викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря двигунами дорожньої техніки, потім ці викиди осаджуються на ґрунт і потрапляють у водні об'єкти прилеглої території.

Під час проведення дорожніх робіт (нове будування, капітальне ремонтування або реконструювання) відбувається вплив на довкілля від будівельної техніки та від виконання самих робіт (риття, переміщення та пересипання ґрунту, піску, щебню; влаштування шарів дорожнього одягу; влаштування покриття). Тривалість дії впливів залежить від обраної технології та задіяної техніки.

Під час експлуатування автомобільної дороги відбуваються викиди забруднюючих речовин від транспортних потоків, які рухаються автомобільною дорогою. Нерівний зруйнований з надмірною шорсткістю покриття автомобільної дороги веде до збільшення витрат палива [2, 3], що в свою чергу веде до збільшення викидів забруднюючих речовин. Невчасно або неякісно зроблений поточний ремонт елементів конструкцій автомобільної дороги або конструкцій для обслуговування автомобільної дороги може привести до зменшення періоду між капітальними ремонтами, що веде до додаткових економічних витрат та впливів на довкілля.

Основна частина

До початку дорожніх робіт фахівці планують задачі щодо мінімізації витрат часу і коштів, впливу на навколишнє середовище, зменшення незручностей для користувачів. Для цього спеціалісти збирають та аналізують вихідні дані. Якщо це існуюча автомобільна дорога, оцінюють її стан, аналізують ступінь зносу дорожнього покриття, інженерних конструкцій, рівень навантаження на дорогу за рахунок збільшення інтенсивності руху транспортного потоку, вплив автомобільної дороги на навколишнє середовище. Розглядають також можливість використання енергозберігаючих технологій (холодний чи гарячий ресайклінг, використання відходів в конструкції дорожнього одягу).

Тобто необхідно враховувати паралельно три складові однієї системи:

- технологічну (використання сучасних довговічних матеріалів та технологій для забезпечення стійкості конструкції);
- економічну (порівняння витрат для різних варіантів під час влаштування, ремонтування та експлуатування);
- екологічну (максимальне збереження природного середовища поряд з автомобільною дорогою, мінімізування викидів забруднюючих речовин).

Особливу увагу приділяють функціонуванню та аналізу складних систем [4, 5].

Найпростішою моделлю системи є модель «чорної скриньки», в якій розглядають призначення та поведінку системи, а її будову відображають у зв'язках із зовнішнім середовищем. Зв'язки з середовищем, що йдуть у систему — це входи, які впливають на неї, а зв'язки, що виходять із системи — виходи, це результати її функціонування, які впливають на зміни у середовищі. В якості «чорної скриньки» розглядаються об'єкти дослідження, внутрішня структура яких невідома або не береться до уваги. Іноді достатньо змістовного опису входів та виходів системи. Звісно, що за допомогою тільки моделі «чорної скриньки» неможливо вивчити внутрішню структуру системи. Необхідно більш докладно дослідити структуру системи, її функції, взаємозв'язки елементів, фактори впливу на систему та життєвий цикл системи. Суть методу «білої скриньки» полягає в повному розумінні та використанні внутрішньої структури, алгоритмів і логіки системи. Суть методу «сірої

скриньки» полягає в комбінації підходів, коли внутрішні процеси системи відомі частково, але не повністю. Процес будівництва автомобільної дороги найчастіше відноситься до методу «сірої скриньки», оскільки ми маємо достатньо інформації про властивості матеріалів, технічні нормативи, технологічні процеси, як влаштовані конструктивні шари дороги. Але не всі внутрішні процеси повністю відомі або контрольовані. Наприклад, точна взаємодія з ґрунтом у кожній конкретній місцевості, довготривала поведінка матеріалів у різних кліматичних умовах, вплив навантаження від кліматичних умов, транспортних потоків з часом. Тому оперують досвідом та випробуваннями.

Автомобільну дорогу можна представити як системний об'єкт, у якого є вхід, процес, вихід (рис. 1).

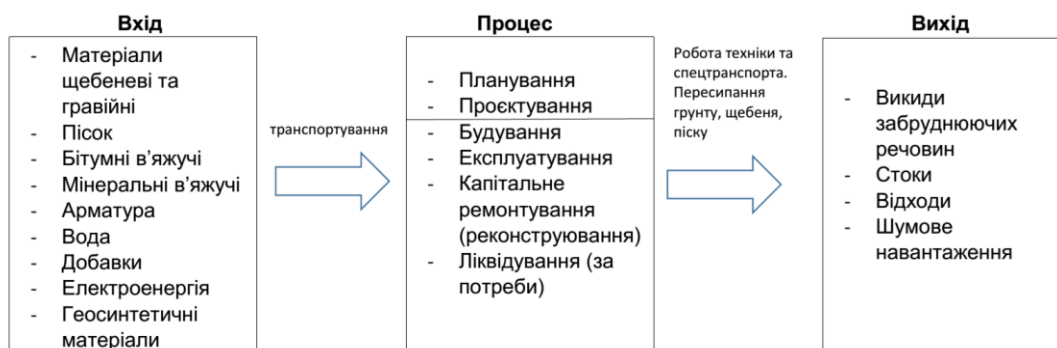


Рисунок 1 — Системний об'єкт «Вхід — процес — вихід»

Входом системи служать матеріали для влаштування конструкції автомобільної дороги (щебінь або гравій, пісок, в'язучі, арматура, добавки, геосинтетичні матеріали тощо), електроенергія, вода.

У результаті процесу влаштування та експлуатування автомобільної дороги утворюються викиди забруднюючих речовин, стоки, відходи, шумове навантаження.

За допомогою системного аналізу автомобільну дорогу розглядають як цілісну систему, яка складається з багатьох окремих елементів. Основним критерієм віднесення елемента до системи є його участь в процесах системи [6].

Одним з інструментів системного аналізу є морфологічна матриця, яка допомагає:

- перерахувати всі можливі варіанти системи;
- комбінувати різні варіанти елементів системи;
- оцінювати їх і вибирати найкращий варіант.

Пропонується морфологічна матриця для конструкції автомобільної дороги (рис. 2). Для цього задану систему (автомобільну дорогу) розділяють на функціональні елементи, які будуть наділені важливими характеристиками і параметрами об'єкту.

У вертикальних стовпчиках морфологічної матриці наведені етапи життєвого циклу (функціональні елементи) автомобільної дороги. Виділені чотири основних функціональних елементи: планування, проектування, дорожні роботи, експлуатування та ліквідування (за потреби). Для кожного з функціональних елементів виділяють основні морфологічні ознаки, від яких залежать економічні та екологічні показники.

Для функціонального елемента «планування» виділено чотири основні ознаки: 1 — маршрут траси, 2 — дорожньо-кліматична зона, 3 — географічні дані, 4 — геологія, гідрогеологія.

Для функціонального елемента «проектування» виділено три основні ознаки: 5 — категорія автомобільної дороги, 6 — матеріал покриття, 7 — матеріали конструкції дорожнього одягу.

Для функціонального елемента «дорожні роботи» виділено чотири основні ознаки: 8 — вид робіт, 9 — технологія, 10 — тривалість періоду дорожніх робіт, 11 — техніка.

Для функціонального елемента «експлуатування» виділено чотири основні ознаки: 12 — моніторинг, 13 — утримування, 14 — дрібне ремонтування, 15 — період між капітальним ремонтуванням.

Окремо винесено ознаку «ліквідування». Ліквідування відбувається у випадку, якщо автомобільна дорога втратила свою цінність і припинилось її експлуатування.

Конструкцію дорожнього одягу та матеріал покриття приймають виходячи з транспортно-експлуатаційних вимог, інтенсивності руху та складу автотранспортних засобів в його потоці, кліматичних ґрунтово-геологічних умов, санітарно-гігієнічних вимог, вимог безпеки та комфортності руху, забезпеченості місцевими будівельними матеріалами. Конструкцію дорожнього одягу розробляють для кожної ділянки дороги або ряду ділянок, якщо вони характеризуються схожими природними умовами та однаковими розрахунковими навантаженнями.

Для прикладу розглянемо нове будівництво автомобільної дороги II категорії з асфальтобетонним покритвом, конструкція дорожнього одягу така [7]:

ЩМА-20(15). БМПП 50/70-65 — 5 см;

Підґрунтовка ЕКШМ-50 — 0,40 л/м²;

АБ.Кр.Щ.А1.НП. БМПА 50/70-60 — 12 см;

Підґрунтовка ЕКШ-50 — 1,20 л/м²;

ЩПС-40, укріплена цементом, марка матеріалу М20 — 17 см;

ЩПС С5 — 21 м;

Пісок щільний природний або з відсівів дроблення гірських порід — 20 м;

ГТ.Н.Т-1.

Якщо позначити кожен варіант реалізації параметром x_{ij} , морфологічна формула такої конструкції дорожнього одягу буде мати вигляд:

$$x_{1.3} + x_{2.2} + x_{3.1} + x_{4.3} + x_{5.2} + x_{6.1} + x_{7.11} + x_{7.2} + (x_{7.1}; x_{7.2}) + (x_{7.1}; x_{7.2}; x_{7.4}) + x_{7.3} + x_{7.6} + x_{7.3} + x_{7.5} + x_{8.1} + x_{9.1} + x_{10.10} + 2x_{11.10} + 3x_{11.1} + 2x_{11.4} + x_{11.13} + x_{11.3} . \quad (1)$$

Автомобільна дорога запланована без обходу населених пунктів (пряма $x_{1.3}$), у II дорожньо-кліматичній зоні ($x_{2.2}$), у рівнинній зоні ($x_{3.1}$), на ділянці поширені глинисті ґрунти ($x_{4.3}$). Конструкція дорожнього одягу автомобільної дороги II категорії ($x_{5.2}$) з асфальтобетонним покритвом ($x_{6.1}$) складається з наступних шарів: геотекстиль ($x_{7.11}$), пісок ($x_{7.2}$), щебенево-піщана суміш ($x_{7.1} + x_{7.2}$), щебенево-піщана суміш укріплена цементом ($x_{7.1} + x_{7.2} + x_{7.4}$), бітумна емульсія ($x_{7.3}$), шар асфальтобетону крупнозернистого, щільного типу А1, непереривчастого зернового складу ($x_{7.6}$), бітумна емульсія ($x_{7.3}$), шар ЩМА ($x_{7.5}$). Заплановано нове будівництво автомобільної дороги ($x_{8.1}$). Передбачається технологія укотковування асфальтобетонної суміші ($x_{9.1}$). Тривалість періоду дорожніх робіт становить 12 місяців ($x_{10.10}$). Буде задіяна основна будівельна техніка: автомобілі бортові — 2 шт ($x_{11.10}$), екскаватори — 3 шт ($x_{11.1}$), катки дорожні — 2 шт ($x_{11.4}$), електростанція пересувна — ($x_{11.13}$), асфальтоукладальник — ($x_{11.3}$).

Розглянемо приклад нового будівництва автомобільної дороги II категорії із цементобетонним покритвом, конструкція дорожнього одягу:

Цементобетон дорожній В_б4,4; В30; F200; W8 — 26 см;

Плівка поліетиленова;

Цементобетон дорожній В_б1,2; В7,5; F75; W4 — 18 см;

ЩПС С5 — 21 м;

Пісок щільний природний або з відсівів дроблення гірських порід — 20 м;

ГТ.Н.Т-1.

Морфологічна формула такої конструкції дорожнього одягу буде мати вигляд:

$$x_{1.2} + x_{2.1} + x_{3.1} + x_{4.4} + x_{5.2} + x_{6.2} + x_{7.11} + x_{7.2} + (x_{7.1}; x_{7.2}) + 2x_{7.7} + x_{8.1} + x_{10.11} + 2x_{11.10} + 3x_{11.1} + x_{11.9} + x_{11.5} + x_{11.7} + x_{11.15} + x_{11.8} + x_{11.16} . \quad (2)$$

Автомобільна дорога запланована з обходом населеного пункту ($x_{1.2}$), у I дорожньо-кліматичній зоні ($x_{2.1}$), у рівнинній зоні ($x_{3.1}$), на ділянці поширені піщані ґрунти ($x_{4.4}$). Конструкція дорожнього одягу автомобільної дороги II категорії ($x_{5.2}$) із цементобетонним покритвом ($x_{6.2}$) складається з наступних шарів: геотекстиль ($x_{7.11}$), пісок ($x_{7.2}$), щебенево-піщана суміш ($x_{7.1} + x_{7.2}$), 2 шари цементобетону ($x_{7.7}$). Заплановано нове будівництво автомобільної дороги ($x_{8.1}$). Тривалість періоду дорожніх робіт становить більше 12 місяців ($x_{10.11}$). Буде задіяна основна будівельна техніка: автомобілі бортові — 2 шт ($x_{11.10}$), екскаватори — 3 шт ($x_{11.1}$), автомобіль-самоскид — ($x_{11.9}$),

бетонозмішувач — ($x_{11.5}$), бетоноукладач — ($x_{11.7}$), нарізувач швів у бетоні — ($x_{11.15}$), машина шліфувальна — ($x_{11.8}$), машина поливальна — ($x_{11.16}$).

Після створення таблиці морфологічної матриці розглядають усі можливі комбінації елементів, аналізують варіанти за критеріями: довговічність, вартість, швидкість будувannya, стійкість до навантажень, ремонтпридатність, екологічний вплив тощо.

Морфологічна матриця структуровано розкладає проблему на частини, дає змогу системно комбінувати рішення та обирати оптимальну конструкцію автомобільної дороги на основі комплексного аналізу всіх можливих варіантів.

Дослідження, які проводили для найбільш поширених типів дорожнього покриття — асфальтобетону та цементобетону показали, що початкова вартість цементобетонного покриття є більш висока порівняно з асфальтобетонним покритвом (за рахунок необхідності використання спеціалізованого комплексу машин; гіршої ремонтпридатності у порівнянні з нежорстким дорожнім одягом; складної технології) [8, 9]. Міцність цементобетонних доріг забезпечується особливою технологією, яка включає створення та накладення кількох шарів на ґрунт. Можемо бачити, що процес будувannya цементобетонних доріг значно складніший і довший за будувannya асфальтобетонних доріг. Звичайний цементобетон набирає міцність 28 діб, використання сучасних домішок дозволяє скоротити процес до 7 днів, але це підвищує вартість.

Однак асфальтобетонний покриття вимагає частішого ремонтування, відповідно частіше працює техніка і відбуваються викиди забруднюючих речовин від неї. Експлуатаційне утримання цементобетонних покриттів обмежується герметизацією та ремонтом швів протягом всього строку служби (від 35 до 40 років), за умови дотримання технології під час первинного влаштування покриття. Протягом цього періоду може відбутися два капітальних ремонти асфальтобетонного покриття та кілька поточних ремонтів з ліквідацією вибоїн. Термін експлуатації дорожнього одягу між капітальними ремонтами визначено у ДБН В.2.3-4:2015 [10]. Тобто, витрати на експлуатаційне утримання асфальтобетонних покриттів можуть бути значно вищі ніж цементобетонних. Хоча за недотриманням технології влаштування цементобетонного покриття тріщина в такому покритті може коштувати мільйони гривень, тому цементобетонні дороги жодних помилок не допускають. Також потребує уваги те, що під час проведення капітального ремонтування автомобільної дороги з асфальтобетонним покритвом достатньо перекрити одну смугу, а під час заміни покриття з асфальтобетонного на цементобетонний необхідно повністю перекривати дорогу та передбачати тимчасові об'їзди або використання інших шляхів руху транспортних потоків.

Слід відмітити, що під час виробництва цементу відбуваються значні викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря [11]. Виробництво цементу є високоенергетичним процесом, який передбачає випалювання клінкеру, в результаті чого викидається значна кількість вуглекислого газу, а також забруднюючі речовини, такі як діоксид сірки, оксиди азоту, оксид вуглецю та інші забруднюючі речовини. Точний склад викидів забруднюючих речовин залежить від типу та кількості палива, яке використовують для випалювання. Виробництво цементобетону — це процес приготування суміші на основі цементу, води, щебню або гравію, піску та хімічних добавок (за потреби) із подальшим укладанням, ущільненням і твердінням для створення жорсткого дорожнього покриття. Виробництво асфальтобетону передбачає нагрівання та змішування бітуму з щебнем чи гравієм, піском та мінеральними добавками. Під час цього процесу вивільняються летючі органічні сполуки та тверді частинки. Також під час експлуатування автомобільної дороги з асфальтобетонним покритвом відбуваються випаровування вуглеводнів за високих температур влітку [12, 13].

Якщо порівнювати різні технології влаштування нежорсткого покриття, то наприклад, використання технології теплового асфальтобетону (WMA) має ряд переваг порівняно з технологією гарячого асфальтобетону (HMA): можливість влаштування покриття в холодну погоду, легше досягти необхідної щільності за допомогою WMA, ніж за допомогою HMA, потрібно менше енергії для нагріву суміші, утворюється менше забруднюючих речовин. Незважаючи на це, дослідження показали, що довговічність такого покриття не висока (з причини високої водопроникності та невисокої адгезії). Тому такий тип покриття не придатний для використання на автомобільних дорогах з високою інтенсивністю транспортних потоків [14, 15].

Вибираючи між автомобільними дорогами з асфальтобетонним або цементобетонним покриттям, необхідно врахувати весь життєвий цикл матеріалів — від виробництва до утилізації. Незважаючи на те, що обидва матеріали мають впливи на навколишнє середовище, прогрес у галузі технологій та практичного досвіду допомагає зменшити ці впливи. Для капітального ремонтування асфальтобетонного покриття використовують екологічні технології (холодний чи гарячий ресайклінг), тоді як переваги цементобетонного покриття в його довговічності, що зменшує потреби в технічному обслуговуванні.

Висновки

Використання методів системного аналізу для обробки великих обсягів даних щодо стану доріг, погодних умов, дорожнього руху і навіть економічної активності у різних регіонах дозволить точно прогнозувати коли і на яких ділянках потрібно проводити капітальне ремонтування, а також визначати пріоритети для проведення ремонтування.

Системний аналіз дозволяє підходити до створення автомобільної дороги комплексно, враховуючи всі етапи її життєвого циклу, що забезпечує ефективне використання ресурсів, довговічність інфраструктури, мінімізацію впливу на довкілля.

Перспективи використання методу системного аналізу в Україні для автомобільних доріг є дуже обнадійливими, і якщо ці методи будуть впроваджені на масштабному рівні, це дозволить значно підвищити ефективність та зменшити витрати на дорожню інфраструктуру. Крім того, використання цих методів може забезпечити більшу стійкість і безпеку дорожньої мережі, покращити якість обслуговування та сприяти сталому розвитку транспортної інфраструктури з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Список літератури

1. Гандзюра В. П. Системний аналіз якості навколишнього середовища: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Київ, 2020. 180 с.
2. Fardzanela Suwanto, Tony Parry, Gordon D. Airey. Review of methodology for life cycle assessment and life cycle cost analysis of asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*. 25(3). P. 1–27. November 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2278149>.
3. Otto Mora, Miguel Figueroa, Claudia Velosa, Daniel Alfonso. Effect of road quality on fuel consumption and the generation of externalities derived from transport. Case of study: Barranquilla, Colombia. *Espacios*. Year 2020. Vol. 41 (Issue 05).
4. Варенко В. М. Системні методи в аналітиці: практика і проблеми вибору. *Бібліотекознавство. Документознавство. Інформологія*. 2022. № 1. С. 48–54
5. Згуровський М. З., Панкратова Н. Д. Основи системного аналізу. Київ : Видавнича група BHV, 2007. 544 с.
6. Матейчик В. П. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Теорія технічних систем». Київ, 2005. 22 с.
7. Альбом конструкцій дорожнього одягу <https://forms.gle/W5FNhNvLgG45AUcd8> (дата звернення 09.09.2025).
8. Нагайчук В. М., Радовський Б. С. Світовий досвід та сучасні підходи до використання цементобетонного покриття. *Дороги і мости*. Київ, 2020. Вип. 21. С. 188–200. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.188>.
9. Mert Atakan, Arzuhan Burcu Gültekin, Kürşat Yıldız. A Comparative Life Cycle Assessment of Asphalt and Rigid Pavements. Conference: 6th international Project and Construction Management Conference (IPCMC2020). Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey. November 2020.
10. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2015, 45 с. (Інформація та документація).
11. Salim Barbhuiya, Fragkoulis Kanavaris, Bibhuti Bhusan Das, Maria Idrees. Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development. *Journal of Building Engineering*. February 2024. Volume 86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108861>.

12. Atef MF Mohammed, Inas A Saleh. A review of environmental emissions from asphalt plants and paving. *Material Science & Engineering International Journal*. April 2023. Volume 7, Issue 2. DOI: [10.15406/mseij.2023.07.00205](https://doi.org/10.15406/mseij.2023.07.00205).
13. Peeyush Khare. Asphalt-related emissions are a major missing source of secondary organic aerosol precursors. *Science Advances* 6(36). September 2020. DOI: [10.1126/sciadv.abb9785](https://doi.org/10.1126/sciadv.abb9785).
14. Abdalrhman Milad, Ali Mohammed Babalghaith, Abdunaser M. Al-Sabaei, Anmar Dulaimi, Abdulmtalab Ali, Sajjala Sreedhar Reddy, Munder Bilema, Nur Izzi Md Yusoff. A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement. *International Journal of Environmental Research and Public Health* (IJERPH). November 2022. DOI: [10.3390/ijerph192214863](https://doi.org/10.3390/ijerph192214863).
15. Gilda Ferrotti, Enrico Mancinelli, Giorgio Passerini, Francesco Canestrari. Comparison of energy and environmental performance between warm and hot mix asphalt concrete production: A case study. *Construction and Building Materials*. Volume 418. 8 February 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135453>.

References

1. Handziura V. P. Systemnyi analiz yakosti navkolyshnoho seredovyscha: Navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchych navchalnykh zakladiv (Analysis of Environmental Quality: A Textbook for Students of Higher Education Institutions) Kyiv, 2020. 180 p. [in English].
2. Fardzanela Suwanto, Tony Parry, Gordon D. Airey. Review of methodology for life cycle assessment and life cycle cost analysis of asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*. 25(3). P. 1–27. November 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2278149> [in English].
3. Otto Mora, Miguel Figueroa, Claudia Velosa, Daniel Alfonso. Effect of road quality on fuel consumption and the generation of externalities derived from transport. Case of study: Barranquilla, Colombia. *Espacios*. Year 2020. Vol. 41 (Issue 05) [in English].
4. Varenko V. M. Systemni metody v analitytsi: praktyka i problemy vyboru (Systemic methods in analytics: practice and problems of choice). *Bibliotekoznavstvo. Dokumentoznavstvo. Informolohiia*. 2022. No. 1. P. 48–54 [in Ukrainian].
5. Zghurovskiy M. Z., Pankratova N. D. Osnovy systemnoho analizu (Fundamentals of System Analysis). Kyiv : Vydavnycha hrupa VNV, 2007. 544 p. [in Ukrainian].
6. Mateichyk V. P. Metodychni vказivky do vykonannya praktychnykh robót z dystsypliny «Teoriia tekhnichnykh system» (Methodological guidelines for practical work in the discipline «Theory of Technical Systems»). Kyiv, 2005. 22 p. [in Ukrainian].
7. Albom konstrukttsii dorozhnoho odiahu (Album of road pavement structures) <https://forms.gle/W5FNhNvLgG45AUcd8> (data zvernennia 09.09.2025) [in Ukrainian].
8. Nahaichuk V. M., Radovskyi B. S. Svitovyi dosvid ta suchasni pidkhody do vykorystannia tsementobetonnoho pokryttia (World experience and modern approaches to the use of cement concrete pavement). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2020. Issue 21. P. 188–200. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.1889> [in Ukrainian].
9. Mert Atakan, Arzuhan Burcu Gültekin, Kürşat Yildiz. A Comparative Life Cycle Assessment of Asphalt and Rigid Pavements. Conference: 6th international Project and Construction Management Conference (IPCMC2020). Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey. November 2020 [in English].
10. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo (Automobile roads. Part I. Design. Part II. Construction). Kyiv, 2015, 45 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
11. Salim Barbhuiya, Fragkoulis Kanavaris, Bibhuti Bhusan Das, Maria Idrees. Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development. *Journal of Building Engineering*. February 2024. Volume 86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108861> [in English].
12. Atef MF Mohammed, Inas A Saleh. A review of environmental emissions from asphalt plants and paving. *Material Science & Engineering International Journal*. April 2023. Volume 7, Issue 2. DOI: [10.15406/mseij.2023.07.00205](https://doi.org/10.15406/mseij.2023.07.00205) [in English].

13. Peeyush Khare. Asphalt-related emissions are a major missing source of secondary organic aerosol precursors. *Science Advances*. 6(36). September 2020. DOI: [10.1126/sciadv.abb9785](https://doi.org/10.1126/sciadv.abb9785) [in English].
 14. Abdalrhman Milad, Ali Mohammed Babalghaith, Abdulnaser M. Al-Sabaei, Anmar Dulaimi, Abdualmtalab Ali, Sajjala Sreedhar Reddy, Munder Bilema, Nur Izzi Md Yusoff. A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement. *International Journal of Environmental Research and Public Health* (IJERPH). November 2022. DOI: [10.3390/ijerph192214863](https://doi.org/10.3390/ijerph192214863) [in English].
 15. Gilda Ferrotti, Enrico Mancinelli, Giorgio Passerini, Francesco Canestrari. Comparison of energy and environmental performance between warm and hot mix asphalt concrete production: A case study. *Construction and Building Materials*. Volume 418. 8 February 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135453> [in English].
-

Inessa Rutkovska¹, Ph.D., Professor, <https://orcid.org/0000-0001-7832-4222>

Lesya Yaroshchuk², <https://orcid.org/0000-0003-1550-0131>

¹National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

²State Enterprise «National Institute for Infrastructure Development» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

SYSTEMATIC APPROACH TO ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT THROUGHOUT THE LIFE CYCLE OF A HIGHWAY

Abstract

Introduction. The road network is a key component of infrastructure, providing numerous opportunities and conveniences, enabling long-distance transportation of goods and passengers. The comfort and well-being of people in various regions and remote areas of the country depend on the uninterrupted movement of vehicles along highways. Unfortunately, over time and due to various external factors, road structures deteriorate and require restoration to extend their service life.

Problem statement. Along with the many advantages of road network operation and development, there is also a negative environmental impact at all stages of the life cycle. Over time, climatic conditions and increasing loads affect road structures, leading to pavement wear, damage, and the need for repairs during operational maintenance. Road works during major repairs or reconstruction require significant amounts of machinery and large volumes of materials.

Objective. There is a need to develop new scientific approaches and research methods aimed at minimizing the use of natural resources and reducing environmental impacts throughout the life cycle of a highway.

Materials and methods. The article proposes the use of the systems analysis method. This method helps to comprehensively assess the condition of existing highways, determine optimal repair technologies, ensure efficient resource use, and minimize both economic costs and environmental impact.

Results. Several known and new methods of systems analysis have been summarized and systematized under modern conditions, with a perspective on their integrated application in the study of the life cycle of a highway.

Conclusions. The proposed systematic approach will make it possible to process large volumes of data, account for interrelated parameters, comprehensively evaluate various options for road structure design, and carry out road works with minimal costs and environmental impact.

Keywords: highway, construction materials, environmental impact, road works, highway life cycle, air pollution, pavement structure, systems analysis.