

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ УКЛАДАННЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ

Я.В. Стешенко, А.Г. Протасов

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: yaroslav.steshik@gmail.com, a.g.protasov@gmail.com

У статті розглянуто питання розробки замкнених автоматизованих систем керування технологічними процесами при укладанні асфальтобетонних покриттів. Замкнені системи, що забезпечують зворотний зв'язок між етапами контролю та виконання, є ключовим елементом сучасної автоматизації технологічних процесів. Їх застосування дозволяє підвищити якість асфальтобетонного покриття, оптимізувати витрати ресурсів і забезпечити відповідність готової продукції нормативним вимогам. Основним результатом дослідження є розробка структурної схеми замкненої системи керування технологічним процесом, яка побудована на принципі оперативного контролю та регулювання технологічних параметрів у процесі укладання асфальтної суміші, що дає змогу адаптувати процеси ущільнення та нагріву асфальтобетону до зміни зовнішніх факторів. Визначено вплив основних технологічних параметрів на якість покриття, запропоновано способи автоматизованого корегування інтенсивності ущільнення залежно від температурних показників. Проведене комп'ютерне моделювання роботи модуля збору оперативних даних дозволило візуалізувати отримані сигнали для подальшого їх аналізу та використання. Результати моделювання підтвердили можливість автоматизації технологічного процесу укладання асфальтобетонного покриття. Запропонована система здатна досягти суттєвого підвищення ефективності та економічності технологічних процесів, що є актуальним у сучасному дорожньо-будівельному комплексі. Бібліогр. 12, рис. 4.

Ключові слова: система керування технологічним процесом, термографія, автоматизація, асфальтобетон, температурний контроль

Вступ. Сучасні технологічні процеси виробництва та укладання асфальтобетонних покриттів вимагають високого рівня точності та відповідності нормативним вимогам. Одним з ключових факторів, що визначають якість асфальтобетону, є дотримання оптимальних температурних режимів під час укладання та ущільнення покриття. Порушення температурного профілю може призводити до виникнення дефектів, таких як: недостатнє ущільнення, тріщини, зниження довговічності покриття та його стійкості до навантажень.

На сьогоднішній день значна частина технологічних процесів у дорожньому будівництві базується на використанні стандартних алгоритмів без урахування реальних умов процесу. Відсутність оперативного зворотного зв'язку між системою контролю та виконання унеможливує корегування параметрів процесу в реальному часі. Це знижує ефективність технологічних операцій та ускладнює досягнення високої якості кінцевого продукту.

У контексті цих проблем актуальним є впровадження замкнених систем автоматизованого керування, які забезпечують постійний моніторинг ключових параметрів, таких як температура асфальтобетону, та їх оперативне корегування. Ін-

теграція сучасних методів контролю, зокрема термографії, у такі системи може значно підвищити якість покриттів і оптимізувати витрати ресурсів.

Мета даного дослідження – розробка замкненої системи автоматизованого керування технологічним процесом укладання асфальтобетону, яка дозволить забезпечити адаптивне керування цим процесом на основі використання методів моніторингу та аналізу даних в реальному часі.

Аналіз останніх досліджень. У сучасному дорожньому будівництві автоматизовані системи керування технологічними процесами відіграють ключову роль у забезпеченні якості та довговічності асфальтобетонних покриттів. Аналіз автоматизованих технологій виявлення та класифікації пошкоджень дорожнього покриття наводиться в [1]. У статті розглядається використання теплових методів неруйнівного контролю для автоматизованого виявлення та класифікації пошкоджень дорожнього покриття. Автори [2] пропонують для діагностики дорожнього покриття використовувати зображення дефектів у двох спектральних діапазонах – у видимому та інфрачервоному. Система, яка реалізує діагностику, перетворює ці зображення до формату, придатного для їх злиття. Такий підхід підвищує вірогідність визначен-

Стешенко Я.В. – <https://orcid.org/0009-0003-5367-1529>, Протасов А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-2965-3334>

© Я.В. Стешенко, А.Г. Протасов, 2025

ня типу дефектів при їх класифікації. Технології злиття зображень, отриманих у двох діапазонах, знайшли широке застосування в реалізації методів діагностики [3, 4].

Сучасний розвиток інтелектуальних алгоритмів дозволив застосовувати для автоматизації контролю стану доріг нейронні мережі. Так, у [5] пропонується система класифікації тріщин у дорожньому покритті на базі нейронної мережі, яка отримала назву «Road Atlas». Архітектура глибокої згорткової нейронної мережі для автоматизованого виявлення тріщин та їх класифікації була використана в [6]. Ефективність і продуктивність роботи запропонованої мережі з виявлення та визначення параметрів тріщин було проаналізовано та представлено в доповіді на міжнародному симпозиумі авторами [7]. Подальше підвищення ступеня автоматизації технологічних процесів, на думку авторів [8], пов'язане зі створенням замкнених систем керування на базі поєднання процесів діагностики з керуванням технологічними процесами в реальному часі. Незважаючи на значний прогрес у цій сфері, існує потреба в подальшій інтеграції різних методів контролю та керування в єдину замкнену систему. Це дозволить забезпечити комплексний підхід до моніторингу та корегування технологічних параметрів під час укладання асфальтобетону, що, у свою чергу, сприятиме підвищенню якості та довговічності дорожніх покриттів.

Отже, аналіз останніх досліджень свідчить про ефективність використання сучасних методів діагностики в системах автоматизованого керування технологічними процесами. Подальший розвиток у цьому напрямку має бути спрямований на створення інтегрованих замкнених систем, які забезпечать високий рівень автоматизації та адаптивності в умовах реального виробництва.

Виклад основного матеріалу. У процесі укладання асфальтобетону відбувається вимірювання

таких основних технологічних параметрів, як його температура та ущільнення, а результати вимірювань використовуються для їх корегування. На рис. 1 пропонується структурна схема такої замкненої системи.

Запропонована система автоматизованого керування забезпечує динамічну адаптацію до змін умов навколишнього середовища та параметрів асфальтобетону. Робота системи базується на постійному зборі даних, їх аналізі та регулюванні роботи техніки у реальному часі. Алгоритм роботи запропонованої системи полягає в наступному. Блок вимірювання початкових характеристик забезпечує вимірювання ключових технологічних параметрів процесу: температуру навколишнього середовища (T_a), температуру асфальту в бункері (T_b), температуру укладеного асфальту (T_p), вологість середовища (H), густину асфальту та швидкість руху техніки (V). Отримані дані передаються в модуль збору оперативних даних, де дані порівнюються з нормативними (згідно з ТУ) та передаються в блок обробки сигналів, де проходить процес обробки отриманих результатів.

На основі отриманих даних підсистема прийняття рішення розраховує оптимальні параметри:

- температуру нагрівача (T_h), яка забезпечує необхідну температуру асфальтобетону для укладки;
- тиск ущільнення (P), який відповідає вимогам до густини матеріалу залежно від вологості;
- швидкість руху техніки (V), що забезпечує рівномірність і якість укладки.

Підсистема прийняття рішень передає розраховані дані в блок регуляторів, який і забезпечує зміну параметрів керування.

Регулятор нагріву корегує роботу нагрівача для підтримки оптимальної температури асфальтобетону відповідно до профілю температур.

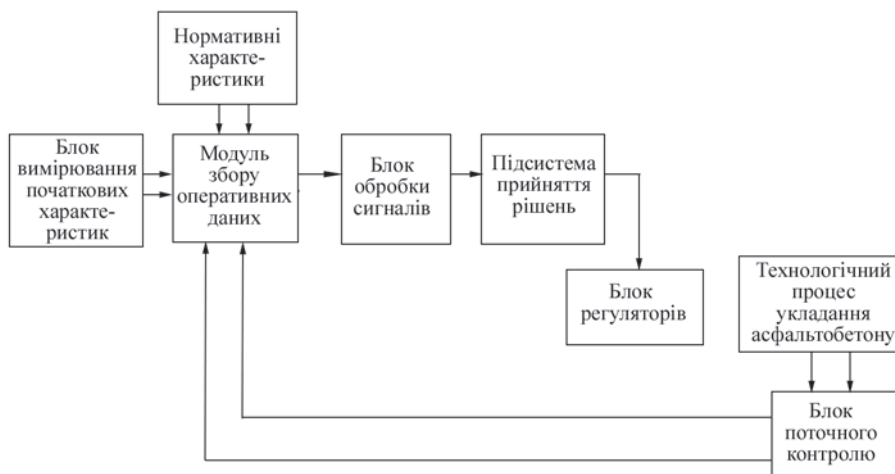


Рис. 1. Структурна схема системи автоматизованого керування технологічним процесом укладання асфальтобетону

Регулятор тиску ущільнення змінює силу ущільнення залежно від густини матеріалу та умов середовища.

Регулятор швидкості адаптує швидкість руху техніки, щоб уникнути перегріву, нерівномірності укладки або надмірного ущільнення.

Після виконання корегувань система отримує оновлені дані від блока поточного контролю, щоб перевірити ефективність внесених змін. Цей зворотний зв'язок забезпечує замкнутий цикл керування, що повторюється до завершення укладки асфальтобетону. У разі відхилення від оптимальних параметрів система автоматично вживає заходів для приведення процесу в межі, задані для забезпечення необхідної якості покриття.

У результаті система забезпечує стабільність процесу, незважаючи на зміну температури навколишнього середовища, сезону, погодних умов або інших зовнішніх факторів, що дозволяє досягти високої якості укладки.

Математичні моделі та алгоритм керування.

1. Модель теплового балансу нагрівача. Для моделювання процесу укладання асфальтобетону важливо розуміти, як температура суміші змінюється в залежності від часу та простору. Під час укладання асфальтобетону температура його поверхні змінюється (знижується) за рахунок конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем. Процес теплообміну можна записати наступним чином:

$$Q = \alpha(T_p - T_a), \quad (1)$$

де Q – тепловий потік, що виникає на поверхні асфальтобетону; α – коефіцієнт тепловіддачі поверхні укладеного асфальтобетону; T_p – температура укладеного асфальтобетону; T_a – температура навколишнього середовища.

Оскільки товщина асфальтобетонного покриття у порівнянні з його шириною та довжиною є величиною незначною, то нею можна знехтувати. Тоді зміна температури покриття в часі буде описуватися двовимірним диференціальним рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \sigma \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \sigma \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2}, \quad (2)$$

де T_p – температура асфальтобетону в точці з координатою (x, y) в момент часу t ; σ – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, який залежить від його густини.

Ці рівняння описують зміну температури в укладеному асфальтобетоні з урахуванням процесу теплообміну, часу укладання та властивостей матеріалу асфальтобетону.

Зміна температури нагрівача T_h регулюється з урахуванням температур навколишнього середовища T_a , асфальту в бункері T_b та укладеного асфальту T_p :

$$\frac{dT_h}{dt} = k_1(T_{\text{задане}} - T_h) - k_2(T_h - T_a) - k_3(T_h - T_b), \quad (3)$$

де k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти теплових втрат/регуляції, $T_{\text{задане}}$ – температура, яка визначена в умовах технологічного процесу.

Означені коефіцієнти залежать від потужності нагрівача, теплопровідності матеріалів, теплообміну з навколишнім середовищем та ефективності передачі тепла до асфальту. Коефіцієнт k_1 визначає швидкість досягнення заданої температури, k_2 враховує теплові втрати, а k_3 відображає ефективність нагріву асфальту. Вони обираються на основі експериментальних вимірювань, аналітичних розрахунків рівнянь теплопередачі та методів оптимізації.

2. Модель ущільнення асфальту. Якість ущільнення залежить від тиску катка на асфальт P , його швидкості V та температури укладеного асфальту T_p [9]:

$$\rho = \rho_{\text{max}}(1 - e^{-\alpha P}) \cdot e^{-\beta(T_{\text{опт}} - T_p)^2}, \quad (4)$$

де ρ – щільність асфальту після ущільнення; ρ_{max} – максимальна можлива густина; $T_{\text{опт}}$ – оптимальна температура для ущільнення; α, β – емпіричні коефіцієнти, які визначаються на основі експериментальних даних шляхом калібрування моделі.

Коефіцієнт α залежить від механічних властивостей асфальтобетонної суміші та характеристик ущільнюючого обладнання, а коефіцієнт β – від температурної чутливості процесу ущільнення, теплопровідності матеріалу та впливу навколишніх умов.

3. Модель швидкості руху техніки. Швидкість катка V впливає на рівномірність укладки. Оптимальна швидкість залежить від температури укладеного асфальту T_p і товщини шару асфальту h . Оптимальна швидкість катка визначається [10]:

$$V_{\text{опт}} = C \cdot \frac{h}{T_p - T_a}, \quad (5)$$

де C – коефіцієнт, що враховує теплофізичні та механічні властивості асфальтобетонної суміші, зокрема її теплопровідність, в'язкість і здатність до ущільнення.

Коефіцієнт C визначається емпірично на основі лабораторних випробувань і корегується для конкретного складу асфальту, умов укладання та типу ущільнюючого обладнання.

4. Зворотний зв'язок (регуляція). Регулятори системи працюють за принципом ПД-контролю. ПД-контроль (пропорційно-інтегрально-диферен-

ційний контроль) – це метод автоматичного регулювання, що використовує три складові: пропорційну, що реагує на поточну похибку; інтегральну, що враховує накопичену похибку для усунення систематичних відхилень; диференціальну, що прогнозує майбутні зміни, зменшуючи коливання [11]. Такий підхід дозволяє забезпечити плавне й точне регулювання параметрів у системі. Для регулювання роботи нагрівача асфальту цей метод може бути реалізовано наступним рівнянням:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{dt}{de(t)}, \quad (6)$$

де $u(t)$ – керуючий сигнал (потужність нагріву); $e(t) = (T_{\text{зад}} - T_h)$ – помилка температури; K_p, K_i, K_d – коефіцієнти пропорційного, інтегрального та диференціального контролю.

Коефіцієнти K_p, K_i, K_d обираються експериментально або методами, такими як Ziegler-Nichols, підбір за відгуком системи або оптимізаційні алгоритми.

5. Вплив вологості повітря. Вологість H враховується через корегування тиску ущільнення:

$$P_{\text{кор}} = P(1 - \gamma H), \quad (7)$$

де γ – коефіцієнт, що залежить від типу асфальту.

Коефіцієнт γ обирається експериментально для кожного типу асфальтобетонної суміші, залежно від її складу, вмісту в'язучих матеріалів та пористості. Він визначається на основі лабораторних досліджень ущільнення з різною вологістю або емпіричних даних з реальних укладок.

У запропонованій автоматизованій системі для керування параметрами процесу використовується принцип регулювання з ІМС регулятором. ІМС (Internal Model Control) регулятор – це метод керування, який базується на ідеї, що регулятор має внутрішню модель процесу, яку він намагається підтримувати в межах заданих параметрів. Основна мета ІМС регулятора – мінімізувати помилки в керуванні шляхом корегування параметрів контролера відповідно до математичної моделі об'єкта керування. У загальному випадку передавальна функція системи з ІМС-регулятором по каналу «завдання–регульована величина» матиме вигляд [12]:

$$Y(s) = \frac{W_p(s)W_{\text{ОБ}}(s)Y_3(s)}{1 + W_p(s)[W_{\text{ОБ}}(s)W_M(s)]}, \quad (8)$$

де $Y(s)$ – вихідна змінна системи (регульована величина); $W_p(s)$ – передавальна функція регулятора; $W_{\text{ОБ}}$ – передавальна функція об'єкта керування (процесу); $W_M(s)$ – передавальна функція математичної моделі об'єкта; $Y_3(s)$ – заданий вплив (вхідний сигнал або завдання).

Результуючий закон керування, який дає найкращий результат, для такої системи визначається як:

$$U(s) = \frac{T_{\text{обм}}s + 1}{K_{\text{обм}}(\lambda s + 1)} E(s) + E_a(s), \quad (9)$$

де $T_{\text{обм}}$ – стала часу об'єкта керування; $K_{\text{обм}}$ – коефіцієнт підсилення об'єкта керування; λs – параметр фільтра, що визначає бажану динаміку системи (часто вибирається виходячи з компромісу між швидкодією та стійкістю); $E(s)$ – помилка регулювання, тобто різниця між заданим і поточним значенням вихідної змінної; $E_a(s)$ – додатковий корегуючий сигнал, що може враховувати зовнішні збурення або адаптацію системи.

Цей вираз визначає алгоритм формування керуючого сигналу $U(s)$ на основі помилки регулювання $E(s)$ та додаткового сигналу $E_a(s)$, що забезпечує оптимальну реакцію системи.

Комп'ютерне моделювання роботи системи.

Для підтвердження працездатності запропонованої замкненої системи автоматизованого керування технологічними процесами при укладанні асфальтобетонних покриттів було проведено комп'ютерне моделювання роботи одного з основних складових системи – модуля збору оперативних даних. При моделюванні було використано мову програмування Python. Коди, що були використані, створювали штучні дані для температури й вологості асфальтобетонного покриття та швидкості руху технічних засобів. Розроблена програма дозволяє візуалізувати отримані сигнали для подальшого аналізу. На рис. 2 продемонстровано графік зміни температури асфальтобетонної суміші в бункері, який відображає дані, отримані блоком збору даних у системі керування. Контроль цього параметра є важливим, оскільки занадто низька температура може призвести до поганої якості укладання, а занадто висока – до передчасного висихання матеріалу.

З графіка видно, що спочатку ($t = 0$ с) температура суміші була 150 °С, далі з часом, на 15-й

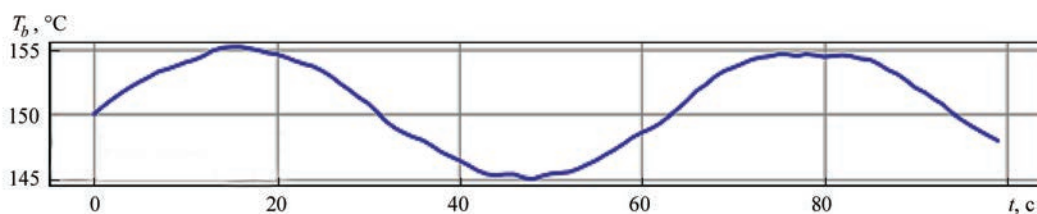


Рис. 2. Розподіл температури асфальтобетонної суміші в бункері

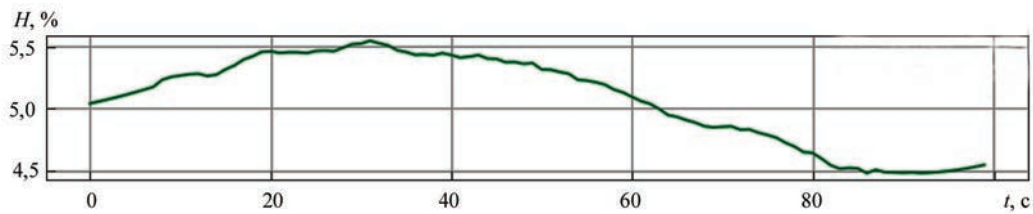


Рис. 3. Зміна рівня вологості матеріалу в бункері

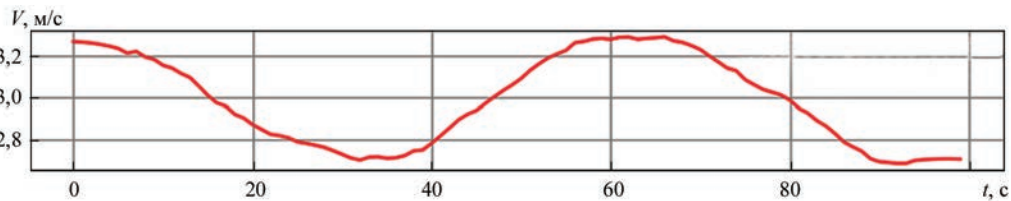


Рис. 4. Зміна швидкості руху асфальтоукладальника

секунді, температура підвищилась до 156 °С. Це означає, що запрацював нагрівач або відбулося накопичення тепла в бункері через недостатнє охолодження. Після цього температура почала зменшуватися, ймовірно, через втрати тепла або припинення роботи нагрівача, та знизилася до 145 °С ($t = 48$ с). Далі температура збільшується за рахунок повторного нагріву або змішування з гарячою сумішшю. На 80-й секунді температура досягає значення 155 °С, після чого знову починає поступово знижуватися, що може бути пов'язано з охолодженням матеріалу в процесі транспортування або з тепловими втратами. У якості висновку графік імітує роботу нагрівача та відображає характер зміни температури під час транспортування та підготовки суміші до укладання.

На рис. 3 показано зміну рівня вологості асфальтобетонної суміші в бункері в процесі транспортування та підготовки до укладання.

Рівень вологості матеріалу є важливим параметром для контролю якості укладання. Висока вологість може знизити адгезію асфальту до основи, а надто низька – негативно вплинути на його еластичність і довговічність. Вологість на момент $t = 0$ с має рівень приблизно 5 %. Протягом перших 40 с спостерігається незначне збільшення вологості до 5,5 %, що може бути пов'язано з конденсацією вологи або змішуванням матеріалу. Після 40-ї секунди рівень вологості починає поступово знижуватися, досягаючи приблизно 4,5 % на 100-й секунді, що, ймовірно, пов'язано з випаровуванням вологи в процесі нагріву матеріалу. У підсумку, графік демонструє зміну рівня вологості асфальтобетонної суміші під час її транспортування та підготовки до укладання. Це дає можливість оцінити ефективність процесу сушіння та передбачити необхідність додаткового контролю параметрів на різних етапах технологічного процесу.

Рис. 4 демонструє зміну швидкості руху асфальтоукладальника.

Початкова швидкість руху асфальтоукладальника становила 3,25 м/с. Далі, з часом, на 25-й секунді, швидкість знизилася до 2,7 м/с. Це може свідчити про уповільнення техніки для точнішого укладання або через нерівності дорожнього полотна. Після цього швидкість починає збільшуватися, ймовірно, у відповідь на стабілізацію процесу укладання, і досягає максимуму 3,3 м/с на 60-й секунді. Потім швидкість знову зменшується, знизившись до 2,7 м/с на 95-й секунді, що може бути пов'язано із завершенням робочого циклу або необхідністю корегування ходу техніки. Представлений графік імітує процес укладання асфальту, де зміна швидкості руху асфальтоукладальника пов'язана з необхідністю дотримання технологічних вимог, рельєфом місцевості або регулюванням подачі матеріалу.

Таким чином, результати комп'ютерного моделювання демонструють адекватність запропонованої моделі контролю технологічних параметрів при реалізації процесу укладання асфальтобетонної суміші.

Висновки

Запропонована структурна схема системи керування технологічним процесом укладання асфальтобетону є замкненою та забезпечує зворотний зв'язок між етапами контролю й виконанням технологічних операцій. Система реалізує автоматизоване корегування параметрів технологічного процесу в залежності від зміни зовнішніх факторів, що забезпечує високу якість укладки дорожнього покриття.

Комп'ютерна модель контролю технологічних параметрів дозволила візуалізувати зміни характеристик технологічного процесу та підтвердила можливість реалізації автоматизованого режиму зміни основних параметрів цього процесу в режимі реального часу.

Список літератури

1. Протасов А.Г., Сторожик Д.В. (2023) Технології автоматизації діагностики дорожнього покриття. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 34(73), 2, 219–227. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/35>
2. Сторожик Д.В., Протасов А.Г. (2024) Автоматизована система діагностики дорожнього покриття з комплексуванням зображень. *Техн. діагност. та неруйнівн. контроль*, 3, 39–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.03.06>
3. Jin, X., Jiang, Q., Yao, S. et al. (2017) A survey of infrared and visual image fusion methods. *Infrared Physics & Technology*, 85, 478–501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.07.010>
4. Paramanandham, N., Rajendiran, K. (2018) Multi sensor image fusion for surveillance applications using hybrid image fusion algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, 77(10), 12405–12436. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-017-4895-3>
5. Chen, Z., Zhang, Y., Luo, Y., Wang, Z. et al. (2021) *Roadatlas: intelligent platform for automated road defect detection and asset management*. ATM Multimedia Asia, 1–3. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.03385>
6. Yusof, N.A.M. et al. (2019) Deep convolution neural network for crack detection on asphalt pavement. *J. of Physics: Conference Series*, 1349, 012020. DOI: <https://doi.org/110.1088/1742-6596/1349/1/012020>
7. Pauly, L., Peel, H., Luo, S., Hogg, D., Fuentes, R. (2017) Deeper networks for pavement crack detection. *34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, pp. 479–485. DOI: <https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0066>
8. Мальований М.С., Русин І., Дячок В., Скиба В., Вознюк Н. (2024) *Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергозбереження. Збалансоване природокористування. Колективна монографія*. За ред. проф. Мальованого М.С. Київ, Ярченко Я.В. <https://liegudzyk.com/stalyy-rozvytok-zakhyst-navkolyshnoho-seredovyshchakolektyvna-monohrafiya-2024>
9. Delgadillo, R., Bahia, H.U. (2008) Effects of temperature and pressure on hot mixed asphalt compaction: Field and laboratory study. *J. of Materials in Civil Engineering*, 20(6), 440–448. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2008\)20:6\(440\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:6(440))
10. Arbeider, E.A. (2005) *A systems approach to the asphalt construction process: thesis for the degree of Dr. ing. Norwegian University of Science and Technology (NTNU)*. Department of Civil and Transport Engineering. Trondheim.
11. Абдулава Е., Бєдін А. (2014) Аналіз автоматизованих систем управління швидкістю скочування відчепів на сортувальних гірках. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 146, 5–8.
12. Ковриго Ю.М., Фоменко Б.В., Степанець О.В. (2010) Система регулювання тепловим навантаженням котла ТПП-210А з використанням регулятора з внутрішньою моделлю. *Вісник економіки транспорту і промисловості*, 10(45), 4–7.

Reference

1. Protasov, A.G., Storozhyk, D.V. (2023) Technologies for automation of road surface diagnostics. *Vcheni Zapysky TNU*, Vol. 34(73), 2, 219–227 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/35>
2. Storozhyk, D.V., Protasov, A.G. (2024) Automated road surface diagnostic system with image complexing. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 3, 39–44 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.03.06>
3. Jin, X., Jiang, Q., Yao, S. et al. (2017) A survey of infrared and visual image fusion methods. *Infrared Physics & Technology*, 85, 478–501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.07.010>
4. Paramanandham, N., Rajendiran, K. (2018) Multi sensor image fusion for surveillance applications using hybrid image fusion algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, 77(10), 12405–12436. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-017-4895-3>
5. Chen, Z., Zhang, Y., Luo, Y., Wang, Z. et al. (2021) *Roadatlas: intelligent platform for automated road defect detection and asset management*. ATM Multimedia Asia, 1–3. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.03385>
6. Yusof, N.A.M. et al. (2019) Deep convolution neural network for crack detection on asphalt pavement. *J. of Physics: Conference Series*, 1349, 012020. DOI: <https://doi.org/110.1088/1742-6596/1349/1/012020>
7. Pauly, L., Peel, H., Luo, S., Hogg, D., Fuentes, R. (2017) Deeper networks for pavement crack detection. *34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, pp. 479–485. DOI: <https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0066>
8. Malovanyi, M.S., Rusyn, I., Diachok, V., Skyba, V., Vozniuk, N. (2024) *Sustainable development: environmental protection. Energy saving. Balanced nature management. Collective monograph*. Ed. by Prof. Malyovanyi M.S. Kyiv, Yarochenko Ya.V. [in Ukrainian]. <https://liegudzyk.com/stalyy-rozvytok-zakhyst-navkolyshnoho-seredovyshchakolektyvna-monohrafiya-2024>
9. Delgadillo, R., Bahia, H.U. (2008) Effects of temperature and pressure on hot mixed asphalt compaction: Field and laboratory study. *J. of Materials in Civil Engineering*, 20(6), 440–448. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2008\)20:6\(440\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:6(440))
10. Arbeider, E.A. (2005) *A systems approach to the asphalt construction process: thesis for the degree of Dr. ing. Norwegian University of Science and Technology (NTNU)*. Department of Civil and Transport Engineering. Trondheim.
11. Abdullayev, E.SH., Byedin, A.V. (2014) Analysis of automated systems speed control slide unhook on a separation of bit-ter. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainського derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 146, 5–8 [in Ukrainian].
12. Kovryho, Yu.M., Fomenko, B.V., Stepanets, O.V. (2010) Thermal load control system of the TPP-210A boiler using a controller with an internal model. *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti*, 10(45), 4–7 [in Ukrainian].

AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF ASPHALT CONCRETE COATING LAYING

Y.V. Steshenko, A.G. Protasov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: yaroslav.steshik@gmail.com, a.g.protasov@gmail.com

The article considers the issue of developing closed-loop automated process control systems for laying asphalt concrete coating. Closed-loop systems that provide feedback between the control and execution stages are a key element of modern automation of technological processes. Their use allows to improve the quality of asphalt concrete coating, optimize resource consumption and ensure compliance of finished products with regulatory requirements. The main result of the study is the development of a structural diagram of a closed-loop process control system, which is built on the principle of operational control and regulation of technological parameters in the process of laying asphalt mixture. This makes it possible to adapt the processes of compaction and heating of asphalt concrete to changing external factors. The influence of the main technological parameters on the coating quality has been determined, and methods for automated adjustment of the compaction intensity depending on temperature indicators have been proposed. The computer modeling of the real-time data collection module operation has made it possible to visualize the received signals for their further analysis and use. The modeling results confirmed the possibility of automating the technological process of laying asphalt concrete coating. The proposed system is capable of achieving a significant increase in the efficiency and cost-effectiveness of technological processes, which is relevant in the modern road construction complex. 12 Ref., 4 Fig.

Keywords: technological process control system, thermography, automation, asphalt concrete, temperature control

Отримано 10.04.25

Отримано у переглянутому вигляді 21.04.25

Прийнято 13.05.25