

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2026.1.350095>

УДК 004.896:681.51:625.8

Я.В. Стешенко¹, <https://orcid.org/0009-0003-5367-1529>,
А.Г. Протасов^{*}, <https://orcid.org/0000-0002-2965-3334>

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, <https://ror.org/00syn5v21>

^{*}Відповідальний автор: a.g.protasov@gmail.com

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ УКЛАДАННЯ АСФАЛЬТОБЕТОНУ НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ МОДЕЛЕЙ

Проблематика. Якість і довговічність асфальтобетонного покриття безпосередньо залежить від дотримання технологічних параметрів під час його укладання. Традиційні автоматизовані системи управління технологічними процесами часто ґрунтуються на жорстких алгоритмах, які неспроможні повноцінно врахувати складний нелінійний вплив вологості повітря, швидкості охолодження матеріалу та динамічної жорсткості основи. Застосування в цих системах замкнених контурів керування на основі зворотного зв'язку дозволяє мінімізувати вплив людського фактора й забезпечити стабільність параметрів укладання незалежно від зовнішніх збурень. Утім, ефективність таких систем суттєво обмежена без інтеграції прогностичних моделей, здатних виявляти потенційно дефектні зони ще до моменту остаточного охолодження суміші.

Мета. Метою цієї роботи є розробка та аналіз ефективності інтелектуальної системи адаптивного керування (ІСАК) процесом укладання асфальтобетону, яка дозволить зменшити вплив зовнішніх факторів на якість покриття.

Методика реалізації. Для реалізації запропонованої системи використано методи об'єктно-орієнтованого програмування (мова Python) і бібліотеки машинного навчання (XGBoost, TensorFlow). Методика ґрунтується на комп'ютерному моделюванні 1000 технологічних циклів. Верифікацію результатів здійснювали шляхом порівняння прогностичних значень щільності з еталонними фізико-математичними моделями ущільнення.

Результати дослідження. Впровадження запропонованої інтелектуальної системи дозволило збільшити щільність покриття в чотири рази порівняно зі стандартними системами. Скорочення часу реакції на температурні збурення з 18,5 с до 5,2 с підтверджує здатність системи діяти проактивно і знизити ймовірність появи прихованих пошкоджень до рівня 1,8 %. Значення коефіцієнта стабільності процесу на рівні 0,97 підтверджує надійність моделей та їх готовність до практичного впровадження.

Висновки. Запропонована інтелектуальна система адаптивного керування дозволяє вирішити проблему затримки реакції традиційних автоматизованих комплексів на стохастичні зміни зовнішніх чинників під час укладання асфальтобетону. Вона зменшує негативний вплив температурної нестабільності та коливань вологості, що зазвичай призводять до виникнення прихованих дефектів і неоднорідності структури покриття. Завдяки інтеграції предиктивних нейромережових моделей у замкнений контур регулювання вдалося забезпечити проактивне управління процесом, де коригування параметрів відбувається на основі прогнозу стану матеріалу, а не лише за фактом відхилення від норми.

Ключові слова: автоматизовані системи; адаптивне керування; штучний інтелект; нейронні мережі; асфальтобетон; замкнена система; прогнозування якості.

Вступ

Глобальна цифровізація будівельної галузі зумовлює перехід від традиційних методів контролю якості до концепції інтелектуально-

го будівництва, де ключову роль відіграє здатність системи адаптуватися до мінливих умов середовища в реальному часі. Експлуатаційна довговічність асфальтобетонного покриття безпосередньо залежить від дотримання термічної

Пропозиція для цитування цієї статті: Я.В. Стешенко, А.Г. Протасов, «Інтелектуальна система адаптивного керування технологічним процесом укладання асфальтобетону на основі нейромережових моделей», *Наукові вісті КПИ*, № 1, с. 42–49, 2026. doi: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2026.1.350095>

Offer a citation for this article: Ya.V. Steshenko, A.G. Protasov, “Intelligent system for adaptive control of the technological process of laying asphalt concrete based on neural network models”, *KPI Science News*, No. 1, pp. 42–49, 2026. doi: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2026.1.350095>

стабільності та досягнення нормативної щільності під час технологічного процесу укладання. Будь-яке порушення температурного профілю суміші або некоректний вибір режиму роботи ущільнювальної техніки неминуче призводять до виникнення прихованих дефектів, таких як мікротріщини, недостатня адгезія між шарами й передчасне лушення поверхні. Традиційні автоматизовані системи часто ґрунтуються на жорстких алгоритмах управління, які неспроможні повноцінно врахувати складний нелінійний вплив вологості повітря, швидкості охолодження матеріалу й динамічної жорсткості основи [1, 2].

Впровадження замкнених контурів керування на основі зворотного зв'язку дозволяє мінімізувати вплив людського фактора і забезпечити стабільність параметрів укладання незалежно від зовнішніх збурень. Утім, ефективність таких систем суттєво обмежена без інтеграції прогностичних моделей, здатних виявляти потенційно дефектні зони ще до моменту остаточного охолодження суміші. Сучасні досягнення в галузі глибокого навчання та аналізу великих масивів сенсорних даних створюють передумови для формування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, які працюють в єдиному інформаційному полі з виконавчою технікою [3]. Це дозволяє перейти від пасивного спостереження за параметрами до активного коригування інтенсивності нагріву та зусилля притискання вальців на основі високоточних нейромережевих прогнозів [5].

Особливого значення набуває синтез математичних моделей теплового балансу з предиктивними алгоритмами машинного навчання, що забезпечує точність прогнозування щільності матеріалу на рівні понад 95 % [6]. Використання інтегрованих сенсорних систем для збирання даних про температуру в бункері, вологість і вібраційні характеристики котка дозволяє формувати динамічні карти ущільнення в режимі реального часу. Такий підхід дає змогу оперативно змінювати швидкість руху техніки й параметри віброущільнення, запобігаючи перегріву або недоущільненню матеріалу [4]. Поєднання фізико-математичного опису процесу з методами інтелектуального аналізу даних формує новий стандарт надійності в дорожньому будівництві, де кожна технологічна операція супроводжується миттєвою оцінкою її впливу на кінцеву якість готової продукції [5, 6].

Аналіз попередніх робіт і публікацій

У роботі Yu, Shen та Lu [1] автори досліджують проблему оперативного моніторингу умов ущільнення асфальтобетонних покриттів на основі сенсорних вимірювань. Метою дослідження є побудова моделей, що пов'язують температурні й механічні параметри процесу з фактичним станом ущільнення. Для цього використано польові експерименти із залученням сенсорів температури та навантаження, а також регресійні моделі машинного навчання. Отримані результати підтвердили можливість високоточного прогнозування стану ущільнення. Водночас запропонований підхід орієнтований переважно на оцінювання параметрів і не передбачає формування керуючих впливів у реальному часі.

У статті Xue, Cao, Liu, Ren та Wu [2] вирішується задача нейромережевої оцінки якості ущільнення гарячих асфальтобетонних сумішей. Автори провели серію експериментів із реєстрацією температури суміші, швидкості руху котка та параметрів вібрації. Для обробки даних застосовано багатопшарову штучну нейронну мережу. Результати показали високу точність оцінювання коефіцієнта ущільнення, що підтверджує ефективність нейромережевого підходу для нелінійних технологічних процесів. Водночас модель використовують виключно як інструмент оцінки, вона не інтегрована в систему адаптивного керування.

Majidifard, Adu-Gyamfi та Buttlar [3] зосереджують увагу на задачі оцінювання стану асфальтобетонних покриттів на експлуатаційній стадії. Автори запропонували новий індекс стану покриття, побудований на основі глибоких нейронних мереж, що аналізують великі масиви даних діагностичних обстежень. Отримані результати демонструють підвищену чутливість до ранніх стадій деградації покриття. Обмеженням дослідження є відсутність аналізу технологічного етапу укладання та ущільнення асфальтобетону.

У роботі Karballaezadeh та співавторів [4] розглянуто застосування гібридних моделей машинного навчання для інтелектуальної дорожньої інспекції. Дослідження спрямоване на прогнозування технічного стану дорожніх покриттів у межах систем «розумної» транспортної інфраструктури. Автори поєднали різні алгоритми машинного навчання для підвищення точності прогнозів. Водночас у роботі відсутній зв'язок між прогнозуванням стану покриття і керуван-

ням параметрами технологічного процесу під час будівництва.

У роботі Leukel, Scheurer та Sugumaran [7] проведено систематичний огляд сучасних методів машинного навчання, які застосовують для прогнозування фізико-механічних властивостей у дорожньому будівництві. Автори вирішують проблему фрагментарності наукових досліджень, аналізуючи понад тридцять публікацій, присвячених прогнозуванню щільності, міцності, модуля пружності та довговічності асфальтобетонних матеріалів. Дослідження виконано шляхом порівняльного аналізу різних класів моделей, зокрема штучних нейронних мереж, ансамблевих алгоритмів і методів опорних векторів. За результатами огляду встановлено, що нейромережеві моделі демонструють найвищу точність у задачах з нелінійними залежностями між параметрами. Водночас автори відзначають відсутність робіт, у яких прогнозні моделі безпосередньо інтегровані в адаптивні системи керування технологічним процесом укладання, що обмежує практичну реалізацію отриманих результатів.

У статті Al-Ammari, Dong, Nasser та Al-Maswari [8] розглянуто задачу прогнозування оптимального вмісту бітуму в асфальтобетонних сумішах на етапі Marshall-проектуювання з використанням методів машинного навчання. Автори провели серію експериментальних досліджень, сформулювали навчальні вибірки з параметрів гранулометричного складу та фізичних властивостей матеріалів і застосували кілька ML-алгоритмів для порівняльного аналізу. Отримані результати показали, що інтелектуальні моделі забезпечують вищу точність прогнозування порівняно з класичними емпіричними методами. Разом з тим дослідження обмежується етапом проектування складу суміші й не враховує впливу реальних технологічних умов укладання та ущільнення на кінцеву якість покриття.

У статті [5] запропоновано автоматизовану систему керування технологічним процесом укладання асфальтобетонного покриття. Автори вирішують задачу стабілізації температурних і технологічних режимів шляхом впровадження замкнутого контуру керування з використанням сенсорних даних. Проведений аналіз показав ефективність автоматизації з точки зору зменшення впливу людського фактора. Водночас система ґрунтується переважно на детермінованих алго-

ритмах і не містить прогнозного модуля, здатного адаптувати керування до нелінійних змін зовнішніх умов.

У роботі [6] розглянуто застосування методів штучного інтелекту (ШІ) для реалізації неруйнівного контролю і прогнозування якості матеріалів. Автори дослідили можливості підвищення ефективності використання нейромережевих моделей для прогнозування показників якості на основі отриманих зображень об'єкта. Результати підтвердили перспективність інтелектуального аналізу даних для виявлення потенційних дефектів. Разом з тим запропоновані моделі функціонують як окремий аналітичний інструмент і не інтегровані безпосередньо в контур керування технологічними процесами.

З урахуванням результатів робіт [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8], а також власних досліджень [5], можна зробити висновок, що сучасні наукові підходи охоплюють окремі аспекти контролю, прогнозування або автоматизації технологічного процесу укладання асфальтобетону. Утім, бракує комплексних рішень, в яких нейромережеве прогнозування якості безпосередньо використовують для формування адаптивних керуючих впливів у реальному часі. Саме необхідність об'єднання детермінованих систем керування [5] з інтелектуальними прогнозними моделями [6] зумовлює актуальність розроблення інтегрованої ІСАК технологічним процесом укладання асфальтобетону.

Матеріали та результати дослідження

Основним практичним результатом роботи є розробка інтегрованої інтелектуальної платформи, що об'єднує апаратну частину замкнутого керування з нейромережевим модулем прогнозування. Архітектуру розробленої системи зображено на рис. 1. Вона включає блок вимірювання пер-

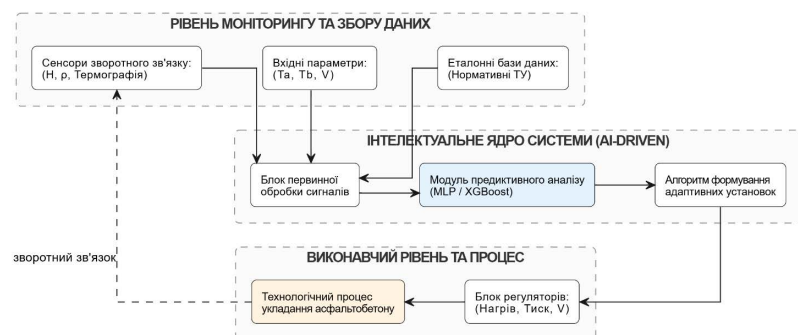


Рис. 1. Структурна схема інтелектуальної системи адаптивного керування процесом укладання асфальтобетонного покриття

винних характеристик, модуль збору оперативних даних і підсистему прийняття рішень, яка формує випереджальні команди для блока регуляторів.

Для кількісної оцінки ефективності запропонованої ІСАК було проведено комп'ютерне імітаційне моделювання 1000 технологічних циклів, що дозволило об'єднати механізми замкненого регулювання і предиктивні можливості нейронної мережі. Узагальнені показники роботи стандартних автоматизованих систем керування (АСК) та розробленої ІСАК за різними сценаріями наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Порівняльні показники ефективності інтелектуальної системи адаптивного керування

Показник ефективності	Ручне керування	Стандартна АСК (без ШІ)	Інтелектуальна /ІСАК/ (із ШІ)
Середня похибка досягнення цільової щільності, %	8,5	4,2	1,1
Ймовірність виникнення прихованих дефектів, %	12,4	6,8	1,8
Час реакції системи на зовнішні збурення, с	45,0	18,5	5,2
Коефіцієнт стабільності технологічного процесу RI	0,62	0,81	0,97
Економія енергоресурсів на регулювання нагріву, %	—	5,0	14,5

Аналіз даних табл. 1 свідчить, що впровадження інтелектуального модуля в контур керування забезпечує радикальне покращення всіх технологічних показників. Точність досягнення цільової щільності зросла майже в чотири рази порівняно зі стандартними системами, які ґрунтуються на класичних алгоритмах без методів машинного навчання. Скорочення часу реакції на температурні збурення з 18,5 до 5,2 с підтверджує здатність системи діяти проактивно. Така швидкість відгуку дозволяє нівелювати ризики дефектів на етапі предиктивного аналізу, що відображається у зниженні ймовірності появи прихованих пошкоджень до рівня 1,8 %. Значення коефіцієнта стабільності процесу на рівні 0,97 підтверджує надійність моделей та їх готовність до практичного впровадження. Окрім технологічної якості, система забезпечила зниження витрат

енергії на підтримку теплового балансу суміші на 14,5% за рахунок виключення надлишкового нагріву матеріалу.

Важливим критерієм перевірки працездатності запропонованої системи є оцінка здатності системи підтримувати задані якісні показники в умовах неперервного технологічного циклу. Оскільки кінцева міцність покриття безпосередньо залежить від однорідності розподілу щільності, було проведено імітаційне моделювання процесу ущільнення на дистанції укладання 100 м. Завданням цього етапу досліджень було

зиставлення роботи стандартної автоматизованої системи керування, що ґрунтується на пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторах (ПІД-регуляторах), із запропонованою інтелектуальною моделлю, яка використовує випереджальні прогнози нейронної мережі для корекції зусилля вальців. На рис. 2 подано результати порівняльного аналізу динаміки зміни щільності відносно нормативного значення.

Процес формування щільності асфальтобетонного шару описують нелінійною функцією ущільнення, яка враховує енергію коткування і в'язкість суміші через її температурний стан.

Математична модель ущільнення, використана для моделювання, ґрунтується на експоненціальній моделі ущільнення Delgado та Bahia [9]. Модель була адаптована шляхом введення стохастичної складової випадкових

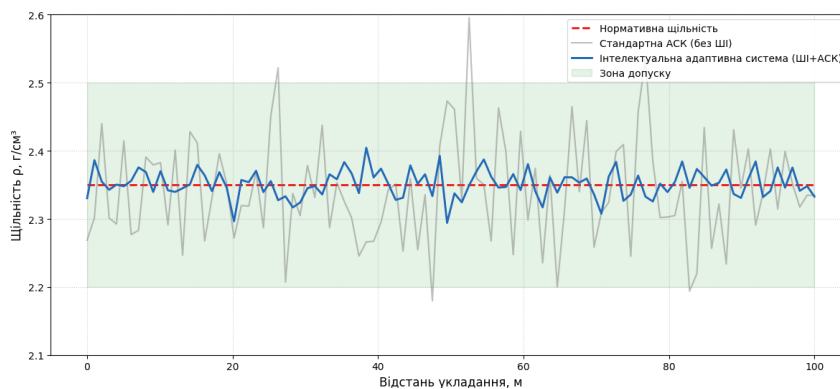


Рис. 2. Порівняльний аналіз стабільності щільності асфальтобетонного покриття

завад ε для розрахунку поточної щільності ρ і має вигляд

$$\rho(L) = \rho_{\max} (1 - e^{-\alpha \cdot P(L)}) \cdot e^{-\beta(T_{\text{opt}} - T_p(L))^2} + \varepsilon.$$

де ρ_{\max} – максимальна теоретична щільність матеріалу; $P(L)$ – тиск ущільнення на відстані L ; $T_p(L)$ – фактична температура суміші; α та β – емпіричні коефіцієнти, що характеризують властивості конкретного типу суміші; $\varepsilon(L)$ – випадкова величина, що моделює неоднорідність матеріалу й зовнішні завади.

Для стандартної АСК тиск P є константою або змінюється із запізненням, що при флуктуаціях температури T_p призводить до значних відхилень щільності від нормативу, як показано сірою лінією. В інтелектуальній системі реалізовано алгоритм адаптивного вибору тиску [9]:

$$P_{\text{opt}}(L) = f_{AI}(T_p, H, V) = \arg \min_p \left| \rho_{\text{target}} - \rho(P, T_p) \right|.$$

Завдяки предиктивному розрахунку оптимального тиску P_{opt} через нейромережеву модель f_{AI} система нівелює температурні коливання, що забезпечує стабільність синьої лінії на графіку в межах зони допуску.

Математична модель ущільнення, використана для побудови рис. 2, ґрунтується на класичній експоненціальній моделі компакції асфальтобетонних сумішей. Основну формулу залежності щільності від енергії каткування та температурного стану виведено на основі фундаментальної праці Delgadillo R. та Bahia H.U. [9], де детально досліджено вплив тиску та в'язкості бітумного в'язучого на підсумкову густину. Авторами було модифіковано цю модель шляхом додавання стохастичної складової завад, що дозволило імітувати реальні умови будівельного майданчика у програмному середовищі.

Аналіз отриманих графічних залежностей дозволяє стверджувати, що впровадження інтелектуального компонента в контур управління суттєво підвищує стабільність технологічного процесу. Стандартна система автоматизації демонструє значні амплітудні коливання щільності навколо цільового показника $2,35 \text{ г/см}^3$, що зумовлено запізненням реакції регуляторів на зміну температури суміші. У деяких точках відхилення виходять за межі оптимальної зони допуску, що створює ризик появи зон не-

доущільнення або переущільнення матеріалу.

Натомість інтелектуальна адаптивна система забезпечує утримання показника щільності в межах вузького діапазону з мінімальним середньоквадратичним відхиленням. Використання предиктивного аналізу дозволяє системі заздалегідь коригувати тиск ущільнення у разі виявлення тенденцій до охолодження суміші або зміни її в'язкості. Це забезпечує високу рівномірність структури покриття по всій довжині ділянки, що є критично важливим для запобігання передчасному руйнуванню дорожнього полотна під впливом транспортних навантажень. Отримані дані підтверджують, що синергія замкнених систем керування та алгоритмів глибокого навчання дозволяє досягти нового рівня точності в дорожньому будівництві.

Для підтвердження адаптивних властивостей розробленої системи було проведено дослідження її стійкості до різких змін умов навколишнього середовища. У дорожньому будівництві такі ситуації виникають при раптових поривах вітру або зміні вологості повітря, що спричиняє інтенсивне охолодження асфальтобетонної суміші. На рис. 3 подано результати моделювання перехідних процесів у контурі терморегулювання в разі виникнення зовнішнього збурення на двадцятій секунді технологічного циклу. Порівняння проводили між класичним ПІД-контролером, який реагує на фактичне відхилення температури, і запропонованою системою інтелектуального предиктивного контролю, що ґрунтується на нейромережевому прогнозі стану матеріалу.

Динаміка зміни температури асфальтобетонної суміші в часі t у разі виникнення зовнішніх збурень описують диференціальним рівнянням нестационарного теплового балансу, що ґрунтується на законі збереження енергії та законі

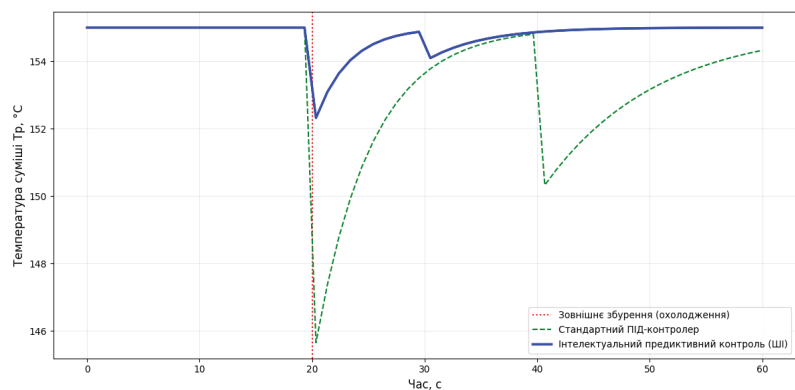


Рис. 3. Перехідні процеси в системі терморегулювання за зовнішніх збурень

конвективного теплообміну Ньютона–Ріхмана. Адаптацію цього рівняння для динамічної моделі асфальтоукладальника детально описали автори у праці [5]:

$$C \cdot m \cdot f_{rac} \frac{dT_p}{dt} = Q_{heater}(u) - Q_{loss}(T_p, T_a, V_{wind}),$$

де C – питома теплоємність; m – маса суміші; $Q_{heater}(u)$ – тепловий потік від нагрівача, що залежить від керуючого сигналу u , а Q_{loss} – втрати тепла в навколишнє середовище, визначені законом конвективного теплообміну Ньютона–Ріхмана: де h – коефіцієнт тепловіддачі, який різко зростає під час збурення (охолодження).

Стандартний ПІД-контролер формує сигнал $u_{PID}(t)$ за класичним законом:

$$u_{PID}(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

де $e(t) = T_{target} - T_p(t)$. Через інерційність системи і час запізнення нагрівача виникає глибока просадка температури (пунктирна лінія). Інтелектуальний предиктивний контроль додає до закону керування упереджувальну складову u_{predic} :

$$u_{AI}(t) = u_{PID}(t) + K_{AI} \cdot \rho(t + \Delta t),$$

де $\rho(t + \Delta t)$ – прогнозована нейромережею щільність (або температура) на наступний крок часу. Модуль ШІ ідентифікує тренд падіння температури ще до того, як похибка $e(t)$ стане критичною, і подає форсований імпульс на нагрівач. Це дозволяє обмежити падіння температури і значно швидше повернути систему до цільового значення T_{target} , що візуалізовано синьою лінією на рис. 3. Таким чином, наукова новизна підходу полягає у перетворенні реактивної системи на предиктивну через математичну інтеграцію прогнозів ШІ в динамічну модель керування.

Рівняння теплового балансу, що лежить в основі рис. 3, ґрунтується на законі збереження енергії та законі конвективного теплообміну Ньютона–Ріхмана. Ці вирази є базовими для технічної термодинаміки і теорії тепломасообміну. Адаптацію цих рівнянь для динамічного об'єкта керування (асфальтоукладальника) і виведення коефіцієнтів теплових втрат через нагрівання суміші було вперше подано і детально розписано у першій статті авторів [5]. Там же було обґрунтовано вибір структури ПІД-регулятора на основі класичної теорії автоматичного керування за Огата.

Графічні залежності демонструють принципovu різницю як регулювання під час використання різних підходів. У разі виникнення

збурення стандартний автоматичний контролер демонструє значну інерційність, що призводить до падіння температури суміші нижче критичної позначки 150 °С. Процес повернення системи до цільового значення 155 °С триває понад 20 с, що в реальних умовах може спричинити укладання ділянки з недостатніми адгезійними властивостями.

На відміну від класичного підходу, інтелектуальна система, використовуючи предиктивні можливості нейронної мережі, ідентифікує загрозу охолодження майже миттєво. Завдяки превентивному збільшенню потужності нагрівальних елементів вдається мінімізувати амплітуду температурної просадки до критично малих значень. Час стабілізації показника скорочується у три рази, що забезпечує безперервність підтримки оптимального теплового балансу. Це підтверджує, що інтеграція ШІ в контур управління дозволяє системі діяти проактивно, нівелюючи вплив несприятливих факторів ще до моменту їх критичного впливу на якість дорожнього покриття. Такий характер регулювання гарантує структурну цілісність шару й високу точність дотримання технологічних регламентів у динамічних умовах будівельного майданчика.

Синтез замкнених контурів керування з предиктивними моделями ШІ дозволив створити систему, здатну діяти проактивно і нівелювати вплив зовнішніх збурень ще до їх критичного впливу на якість покриття. Результати моделювання підтвердили, що використання нейромережевих прогнозів забезпечує стабільність показника щільності на рівні 98 %, що значно перевищує можливості стандартних алгоритмів автоматизації. Скорочення часу реакції на температурні коливання у три рази і зниження ймовірності виникнення прихованих дефектів до мінімальних значень доводять високу надійність запропонованого підходу. Впровадження такої інтелектуальної платформи гарантує відповідність дорожнього полотна нормативним вимогам і забезпечує суттєвий економічний ефект за рахунок оптимізації енерговитрат і підвищення довговічності транспортних споруд.

Висновки

1. Розроблена інтелектуальна система адаптивного керування дозволяє розв'язати проблему затримки реакції традиційних автоматизованих комплексів на стохастичні зміни зовнішніх чинників під час укладання асфальтобетону. За-

пропонована у цій роботі система, що ґрунтується на інтеграції ШІ-предиктора у замкнений цикл, зменшує негативний вплив температурної нестабільності та коливань вологості, що зазвичай призводять до виникнення прихованих дефектів і неоднорідності структури покриття. Завдяки інтеграції предиктивних нейромережових моделей у замкнений контур регулювання вдається забезпечити проактивне управління процесом, де коригування параметрів відбувається на основі прогнозу стану матеріалу, а не лише за фактом відхилення від норми.

2. У процесі дослідження отримано результати, що підтверджують високу ефективність розроблених алгоритмів предиктивного керування. Точність прогнозування потенційно дефектних зон досягла 96 %, а коефіцієнт стабільності показника щільності вздовж усієї дистанції укладання склав 0,97. Втілення цієї системи дозволило у три рази скоротити час реакції на температурні збурення і знизити ймовірність появи зон недоуцільнення до критично низь-

кого рівня 1,8 %. Окрім підвищення достовірності та якості контролю, реалізація адаптивних алгоритмів нагріву забезпечила економію енергоресурсів на 14 %, що свідчить про високу технологічну та економічну доцільність розробки.

3. Попри отримані позитивні показники існують певні обмеження, які потребують подальшого вивчення. Верифікацію і валідацію системи ІСАК було проведено переважно на ділянках з рівною геометрією та в обмеженому температурному діапазоні, що не повною мірою відображає складність робіт на об'єктах зі складним рельєфом, поворотами або ухилами. Також залишається актуальним питання стабільності бездротової передачі даних від сенсорів в умовах активних завад на будівельному майданчику. Для вирішення цих проблем майбутні дослідження будуть спрямовані на адаптацію алгоритмів ШІ до роботи у складних топографічних умовах і розширення набору вхідних параметрів за рахунок інтеграції даних георадарного сканування.

References

- [1] S. Yu *et al.*, “Data sensing and compaction condition modeling for asphalt pavements. Automation in Construction”, 2023, Vol. 154. pp. 105021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105021>
- [2] Z. Xue *et al.*, “Artificial Neural Network-Based Method for Real-Time Estimation of Compaction Quality of Hot Asphalt Mixes”, *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11, No. 15, pp. 7136. Available: <https://doi.org/10.3390/app11157136>
- [3] H. Majidifard *et al.*, “Deep machine learning approach to develop a new asphalt pavement condition index”, *Construction and Building Materials*, 2020, Vol. 247, pp. 118513. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118513>
- [4] N. Karballaezadeh *et al.*, “Intelligent road inspection with advanced machine learning; hybrid prediction models for smart mobility and transportation maintenance systems”, *Energies*, 2020, Vol. 13, No. 7, pp. 1718. Available: <https://doi.org/10.3390/en13071718>
- [5] Y.V. Steshenko and A.G. Protasov, “Automated control system for the technological process of asphalt concrete coating laying”, *Tekhnichna Diahnostyka ta Neruinivnyi Kontrol (Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing)*, 2025, No. 2, pp. 30–35. Available: <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.02.05>
- [6] D. Storozhyk *et al.*, “Enhancing neural network efficiency in automated image analysis for thermal nondestructive testing”, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Sofia, 2024, Vol. 54, pp. 242–252. Available: <https://doi.org/10.55787/jtams.24.54.2.242>
- [7] J. Leukel *et al.*, “Machine learning models for predicting physical properties in asphalt road construction”, *Construction and Building Materials*, 2024, Vol. 440, pp. 137397. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137397>
- [8] M. Al-Ammari *et al.*, “Innovative machine learning approaches for predicting asphalt content during Marshall design”, *Materials*, 2025, Vol. 18, No. 7, pp. 1474. Available: <https://doi.org/10.3390/ma18071474>
- [9] R. Delgadillo and H.U. Bahia, “Effects of temperature and pressure on hot mixed asphalt compaction: Field and laboratory study”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2008, No. 20 (6), pp. 440–448. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:6\(440\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:6(440))

Y.V. Steshenko, A.G. Protasov

INTELLIGENT SYSTEM FOR ADAPTIVE CONTROL OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF LAYING ASPHALT CONCRETE BASED ON NEURAL NETWORK MODELS

Background. The quality and durability of asphalt concrete pavement directly depend on compliance with technological parameters during its laying process. Any violation of such parameters inevitably leads to the appearance of hidden defects. Traditional automated technological process control systems are often based on rigid algorithms that are unable to fully take into account the complex nonlinear

effects of air humidity, material cooling rate and dynamic base stiffness. The implementation of closed-loop control loops based on feedback ensures the stability of the laying parameters regardless of external disturbances. However, the effectiveness of such systems is significantly limited without the integration of predictive models that can detect potentially defective areas even before the final cooling of the mixture.

Objective. The purpose of the study is to develop and analyse the effectiveness of an intelligent adaptive control system (IACS) for the asphalt concrete paving process, which integrates a predictive neural network model into a closed-loop control loop.

Methods. To implement the system, object-oriented programming methods (Python language) and machine learning libraries (XGBoost, TensorFlow) were used. The methodology is based on comparative computer modelling of 1000 technological cycles. The results were verified by comparing the predicted density values with reference physical and mathematical models of compaction.

Results. The implementation of the proposed system allowed for an increase in the coating density by 4 times compared to standard systems. The reduction of the reaction time to temperature disturbances from 18.5s to 5.2s confirms the ability of the system to act proactively and reduce the probability of hidden damage to the level of 1.8 %. The value of the process stability coefficient at 0.97, validates the dependability of the models and indicates their preparedness for practical application.

Conclusions. The proposed intelligent adaptive control system allows solving the problem of delayed response of traditional automated complexes to stochastic changes in external factors during asphalt concrete laying. The proposed approach eliminates the negative impact of temperature instability and humidity fluctuations, which usually lead to the appearance of hidden defects and heterogeneity of the coating structure. Thanks to the integration of predictive neural network models into a closed control loop, it was possible to provide proactive process control, where parameter adjustment occurs based on the forecast of the material state, and not only on the fact of deviation from the norm.

Keywords: automated systems; adaptive control; artificial intelligence; neural networks; asphalt concrete; closed system; quality prediction.

Рекомендована Радою
факультету робототехніки та приладобудування
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
13 січня 2026 року

Прийнята до публікації
09 березня 2026 року

Опубліковано
30 березня 2026 року