УДК 681.518.54:625.85:004.852

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АРХІТЕКТУР НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ РЕГРЕСІЙНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ

Стешенко Я. В.
Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна
E-mail: yaroslav.steshik@gmail.com

У роботі розглядається задача неруйнівного прогнозування фізико-механічних параметрів асфальтобетонного покриття в режимі реального часу на основі технологічних даних процесу укладання. Запропоновано підхід до порівняльного аналізу архітектур нейронних мереж (MLP, SVR, XGBoost та гібридних DNN-ансамблів) для регресійного прогнозування щільності, динамічного модуля пружності та стабільності за Маршаллом. Попередні результати підтвердили перевагу нейромережевого підходу над лінійною регресією: коефіцієнт детермінації зріс з $R^2 = 0{,}70$ до $R^2 = 0{,}97$, що вказує на можливість точного прогнозування якості покриття без застосування руйнівних методів контролю та створює передумови для інтеграції моделі у замкнену систему автоматизованого керування укладанням асфальтобетону.

Контроль якості асфальтобетонних покриттів під час їх укладання є критично важливим етапом дорожнього будівництва, що безпосередньо визначає довговічність та надійність дорожньої інфраструктури. Традиційні методи визначення фізико-механічних параметрів (зокрема щільності та ступеня ущільнення) базуються переважно на відборі кернових зразків та їх лабораторному аналізі: ці методи є руйнівними, охоплюють лише обмежені ділянки покриття та не забезпечують безперервного моніторингу в режимі реального часу [1]. Визначення динамічного модуля пружності та інших характеристик асфальтобетону потребує складних і тривалих лабораторних випробувань [2].

Для подолання зазначених обмежень перспективним є застосування методів машинного навчання. Нейронні мережі дозволяють отримувати прогностичні моделі механічних параметрів асфальтобетону без лабораторних випробувань [3], проте різні архітектури (від класичних MLP до гібридних ансамблевих моделей) демонструють суттєво різну точність залежно від характеру даних і прогнозованого параметра [4], що зумовлює необхідність їх систематичного порівняльного аналізу.

У рамках цього дослідження пропонується виконати порівняльний аналіз архітектур нейронних мереж для задач регресії фізико-механічних параметрів асфальтобетону (щільності, модуля пружності та стабільності за Маршаллом) на основі даних, отриманих у процесі технологічного контролю укладання покриття. Розроблені моделі є складовою частиною раніше запропонованої

авторами замкненої системи автоматизованого керування технологічним процесом укладання асфальтобетону [5], в якій прогнозування фізико-механічних параметрів покриття виступає ключовим елементом зворотного зв'язку. Інтеграція точних регресійних моделей у цю систему дозволить забезпечити прогнозування якості в режимі реального часу без застосування руйнівних методів контролю.

Baldo et al. [3] застосували feedforward ANN з одним прихованим шаром (10 нейронів) для прогнозування стабільності за Маршаллом, плинності та модуля жорсткості на лабораторних даних сумішей з діабазовим заповнювачем. Отримані коефіцієнти кореляції у фазі тестування склали 0,910–0,988. Обмеженням є фіксована архітектура без порівняльного аналізу та відсутність перевірки в умовах реального укладання.

Androjić та Marović [6] порівняли ANN і множинну лінійну регресію (MLR) для прогнозування вмісту повітряних пор і бітуму в гарячих сумішах (386 зразків). ANN перевершила MLR за вмістом пор (кореляція 0,918 проти 0,815), але не за вмістом бітуму (0,92 проти 0,96). Серед обмежень роботи слід відзначити використання даних з однієї лабораторії та відсутність глибших або ансамблевих архітектур.

Dao et al. [2] порівняли ANN, SVM, GPR та ансамблеві градієнтні дерева (Boosted) для прогнозування динамічного модуля пружності теплого асфальтобетону з вмістом вторинного асфальту до 50%. Найкращий результат показав Boosted ($R = 0,9956$ проти $R = 0,9954$ у ANN), підтвердивши перевагу ансамблів. Проте модель обмежена специфічним типом суміші з добавками Sasobit/Zycotherm і не придатна для стандартних умов укладання.

Golafshani et al. [4] запропонували гібридну модель DNN зі стекінгом ансамблевих алгоритмів (XGBoost, LightGBM, CatBoost та ін.) для прогнозування стабільності за Маршаллом. Найкращий результат показала комбінація DNN-CatBoost: $R^2 = 0,86$. SHAP-аналіз виявив об'ємну питому вагу заповнювача як найвагоміший предиктор. Роботу обмежує орієнтація виключно на лабораторне проєктування складу без адаптації до режиму реального часу в процесі укладання.

Аналіз існуючих досліджень виявляє низку невирішених проблем: більшість моделей розроблені для лабораторних умов і не придатні для інтеграції в системи керування; порівняльні дослідження обмежуються одним-двома типами архітектур; жодна з розглянутих робіт не розглядає одночасний регресійний прогноз кількох параметрів на основі технологічних даних укладання.

Для вирішення цих проблем у роботі пропонується провести систематичний порівняльний аналіз архітектур MLP, Random Forest, XGBoost та гібридних DNN-ансамблів для багатопараметричної регресії фізико-механічних характеристик асфальтобетону з подальшою інтеграцією найточнішої моделі в замкнену систему автоматизованого керування [5].

Результати дослідження

На першому етапі дослідження виконано порівняльний аналіз MLP та лінійної регресії для прогнозування щільності асфальтобетонного покриття. Вхідними параметрами слугували технологічні характеристики укладання: температура суміші (T_p), температура повітря (T_a), вологість (H), тиск ущільнення (P), швидкість котка (V) та кількість проходів (N). Навчальна вибірка з 1000 прикладів сформована на основі емпірико-аналітичної моделі ущільнення.

Результати порівняння наведено в таблиці 1. Модель MLP з трьома прихованими шарами, функцією активації ReLU та механізмом ранньої зупинки продемонструвала суттєво вищу точність порівняно з лінійною регресією за всіма метриками оцінювання.

Таблиця 1. Порівняння точності моделей прогнозування щільності

Модель	**MAE (г/см³)**	**RMSE (г/см³)**	**R^2**
Лінійна регресія	0,9284	1,1517	0,7001
MLP (нейронна мережа)	0,2663	0,3378	0,9742

Отримані результати підтверджують, що нейронна мережа здатна коректно відображати нелінійні залежності між технологічними параметрами укладання та фактичною щільністю покриття, забезпечуючи підвищення точності прогнозу майже у чотири рази порівняно з лінійною регресією. Аналіз важливості ознак за моделлю XGBoost додатково показав, що найбільший вплив на якість прогнозу мають температура укладання (T_p) та вологість (H), тоді як температура навколишнього середовища (T_a) виявилась найменш значущою, що узгоджується з фізичними закономірностями процесу ущільнення.

На наступному етапі дослідження планується розширити порівняльний аналіз шляхом включення додаткових архітектур: методу опорних векторів для регресії (SVR), градієнтного бустингу (XGBoost) та гібридної моделі DNN зі стекінгом, а також розширити перелік прогнозованих параметрів якості, включивши динамічний модуль пружності E* та стабільність за Маршаллом. Відібрана за результатами аналізу оптимальна модель буде інтегрована в замкнену триконтурну систему автоматизованого керування [5] як модуль прогнозування якості у зворотному зв'язку, що дозволить здійснювати коригування параметрів ущільнення в режимі реального часу без застосування руйнівних методів контролю.

Запропонований підхід до регресійного прогнозування фізико-механічних параметрів асфальтобетону на основі нейронних мереж дозволяє розв'язати ключову проблему відсутності неруйнівних методів оцінки якості покриття в режимі реального часу. Порівняння MLP з лінійною регресією підтвердило перевагу нейромережевого підходу: коефіцієнт детермінації зріс з $R^2 = 0,7001$ до $R^2 = 0,9742$, а середня абсолютна похибка зменшилась у 3,5 рази (з 0,9284 до 0,2663 г/см³). Це підтверджує можливість точного прогнозування щільності покриття безпосередньо під час укладання на основі технологічних сенсорних

даних, що підвищує ефективність контролю якості та дозволяє своєчасно коригувати параметри ущільнення без відбору кернових зразків.

Основним обмеженням поточного етапу є використання синтетично згенерованих навчальних даних та обмежений набір порівнюваних архітектур. У подальших дослідженнях планується розширити аналіз на моделі SVR, XGBoost та гібридні DNN-ансамблі, включити до прогнозованих параметрів динамічний модуль пружності E* та стабільність за Маршаллом, а також верифікувати моделі на реальних польових вимірюваннях. Фінальним результатом стане інтеграція найточнішої моделі у замкнену систему автоматизованого керування укладанням асфальтобетону [5] як модуль прогнозування якості у зворотному зв'язку.

Ключові слова: нейронна мережа, асфальтобетон, регресія, контроль якості.

Література

[1] Wang S., Sui X., Leng Z., Jiang J., Lu G. Asphalt pavement density measurement using non-destructive testing methods: current practices, challenges, and future vision , *Construction and Building Materials*, vol. 344, Art. no. 128154, 2022.

[2] Dao D. V., Nguyen N.-L., Ly H.-B., Pham B. T., Le T.-T. Cost-effective approaches based on machine learning to predict dynamic modulus of warm mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement , *Materials*, vol. 13, no. 15, Art. no. 3272, 2020.

[3] Baldo N., Miani M., Rondinella F., Celauro C. Analysis of the mechanical behaviour of asphalt concretes using artificial neural networks , *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, Art. no. 1650945, 2018.

[4] Golafshani E. M., Behnood A., Arashpour M. Enhancing Marshall stability of asphalt concrete using a hybrid deep neural network and ensemble learning , *Case Studies in Construction Materials*, 2025.

[5] Стешенко Я. В., Протасов А. Г. Автоматизована система керування технологічним процесом укладання асфальтобетонного покриття , *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, no. 2, pp. 30-35, 2025.

[6] Androjić I., Marović I. Development of artificial neural network and multiple linear regression models in the prediction process of the hot mix asphalt properties , *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 44, no. 12, pp. 994-1004, 2017.

UDC 620.179.16

IMPROVING THE RELIABILITY OF ULTRASONIC TESTING FOR MATERIALS WITH HETEROGENEOUS STRUCTURE

Galagan R.
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine
E-mail: r.galagan@kpi.ua

Ultrasonic testing is a widely used non-destructive evaluation method for assessing material integrity. In heterogeneous materials, such as ceramic insulators, structural non-uniformity significantly affects wave propagation characteristics.

A key diagnostic parameter is the ultrasonic wave velocity [1]:

$$v = H / t,$$