

Кандидати техн. наук А. О. КАГРАМАНЯН,
М. Є. РЕЗУНЕНКО,

д-р екон. наук Н. Г. ПАНЧЕНКО,
канд. техн. наук О. М. ОБОЗНИЙ



РОЗРОБЛЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИКИДІВ ДИЗЕЛІВ ТЕПЛОВОЗІВ З УРАХУВАННЯМ РЕАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Анотація. У статті розглянуто проблему прогнозування викидів забруднюючих речовин дизелями тепловозів в експлуатаційних умовах. Проаналізовано нормативні та наукові підходи щодо оцінювання емісії. Запропоновано інтеграцію тягових розрахунків, паливно-енергетичних параметрів і емісійних характеристик дизеля. Визначено обмеження наявних методик і доцільність створення автоматизованої системи оперативного оцінювання екологічних показників локомотива під час експлуатації на маршрутах різної складності.

Ключові слова: тепловоз, дизель, прогнозування викидів, забруднюючі речовини, ремонт за фактичним технічним станом.

Вступ.

Дизельна тяга залишається невід'ємною складовою перевізного процесу на неелектрифікованих ділянках залізничної мережі, забезпечуючи як вантажні, так і пасажирські перевезення. Водночас значну частину локомотивного парку експлуатують понад нормативні строки, що супроводжено зростанням зношеності циліндропоршневої групи, паливної апаратури та допоміжних систем. Наслідком цього є підвищені витрати палива та зростання експлуатаційних викидів оксидів азоту (NO_x), монооксиду вуглецю (CO), вуглеводнів і твердих частинок, а також збільшення обсягів викидів CO₂ як основного парникового газу.

Проблема набуває особливої актуальності в умовах посилення міжнародних вимог щодо декарбонізації транспортного сектору та підвищення стандартів якості атмосферного повітря. У європейській практиці контроль за концентраціями забруднюючих речовин у повітрі здійснюється відповідно до Директиви 2008/50/ЕС, яка встановлює граничні та цільові показники для основних домішок, зокрема NO₂ і твердих частинок (PM). Отже, навіть якщо дизельна тяга не є домінуючим джерелом забруднення в масштабі країни, у локальних зонах інтенсивного руху її внесок може бути суттєвим, особливо за умов морально та фізично застарілого рухомого складу.

Експлуатаційне прогнозування має бути базоване на інтеграції тягового розрахунку з моделлю роботи дизеля та емісійними характеристиками. Це передбачає врахування профілю колії, маси поїзда, швидкості руху, опорів руху, а також технічного стану силової установки. У такій системі витрати палива та викиди NO_x, CO, PM і показники димності розглядають не як усереднені величини, а як функції часу та режиму навантаження двигуна протягом конкретного рейсу.

© КАГРАМАНЯН А. О., РЕЗУНЕНКО М. Є., ПАНЧЕНКО Н. Г., ОБОЗНИЙ О. М., 2026

Перехід до автоматизованого прогнозування створює можливість не лише більш точно оцінювати екологічний вплив тепловозної тяги, а і використовувати екологічні показники як критерій ефективності технічного обслуговування і ремонту. За умов наявності відповідної моделі можна кількісно пов'язати зміну компресії, характеристик упорскування чи точності регулювання з очікуваною динамікою викидів у русі. Це відкриває перспективу формування системи ремонту за технічним станом, у якій екологічна складова стає повноцінним елементом ухвалення інженерних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблема зниження шкідливих викидів від дизельного рухомого складу залізниць є актуальною як у контексті екологічної безпеки, так і аспекти підвищення енергоефективності перевізного процесу. В Україні нормування та методичні засади визначення викидів тепловозних дизелів регламентовані галузевим стандартом ГСТУ 32.001-94, який встановлює норми та методи оцінювання викидів забруднюючих речовин із відпрацьованими газами тепловозних дизелів [1]. Водночас зазначений підхід орієнтований переважно на регламентовані умови випробувань і не повною мірою враховує змінність режимів роботи локомотива в реальній експлуатації.

Міжнародна практика оцінювання емісій дизельних двигунів базована на стандартах серії ISO 8178, у яких визначено вимоги щодо систем вимірювання газоподібних і твердих забруднюючих речовин, а також типові випробувальні цикли для різних сфер застосування двигунів [2, 3]. Ці стандарти створюють важливу методичну основу для порівняння показників двигунів, однак їх використання здебільшого пов'язане зі стендовими або стандартизованими режимами, що обмежує

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

можливість безпосереднього прогнозування викидів у конкретних експлуатаційних умовах руху поїзда.

На рівні європейської екологічної політики вимоги щодо контролю якості атмосферного повітря та скорочення викидів забруднюючих речовин визначені Директивою 2008/50/ЄС, Директивою (EU) 2016/2284 і Регламентом (EU) 2016/1628, який встановлює обмеження щодо викидів двигунів позашляхової техніки, до якої належить і частина залізничного тягового рухомого складу [5–7]. Зазначені документи формують нормативні передумови для вдосконалення методів контролю, оцінювання та прогнозування викидів дизельних енергетичних установок.

Для інвентаризаційних оцінок на макрорівні в європейській практиці широко використовують методику ЕМЕР/ЕЕА Guidebook, у якій для залізничного транспорту запропоновано підходи щодо розрахунку викидів за агрегованими показниками діяльності та типами рухомого складу [4]. Проте інвентаризаційні методи орієнтовані насамперед на галузевий або регіональний рівень і не забезпечують достатньої точності для прогнозування викидів конкретного локомотива на окремому маршруті з урахуванням профілю колії, ваги состава, швидкісного режиму та поточного технічного стану дизеля.

У наукових працях вітчизняних дослідників розглянуто підходи щодо розрахунку викидів забруднюючих речовин тепловозними дизелями, а також встановлено вплив основних експлуатаційних факторів на рівень емісії [8, 9]. Зокрема, показано, що величини викидів істотно залежать від режимів навантаження, витрат палива, технічного стану силової установки та умов експлуатації. Разом із тим у цих роботах обмежено розглянуто питання інтеграції тягових розрахунків із моделями утворення викидів для оперативного прогнозування екологічних показників у процесі руху.

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із вимірюванням реальних викидів локомотивів під час експлуатації. У роботі [10] показано, що фактичні показники емісії дизельного рухомого складу суттєво залежать від перехідних режимів роботи, профілю маршруту і реальних умов руху, які не повністю відтворені в стандартних випробувальних циклах. Це підтверджує необхідність розроблення підходів, орієнтованих саме на експлуатаційне прогнозування викидів.

У праці [11] показано, що перехідні режими роботи локомотивних дизелів суттєво впливають на енергетичні показники і мають бути враховані під час математичного моделювання експлуатаційних процесів. У роботі [12] досліджено емісійні фактори відпрацьованих газів дизельних локомотивів залежно від витрат палива, потужності двигуна та режиму руху. У статті [13] проаналізовано газоподібні викиди дизельного локомотива в реальних умовах експлуатації із застосуванням PEMS і встановлено зв'язок між викидами і навантаженням двигуна.

Праця [14] присвячена побудові спрощеної моделі витрат палива дизельного поїзда в реальному часі на основі експлуатаційних параметрів руху. У дослідженні [15] показано, що реальні умови руху локомотива істотно відрізняються від типових сертифікаційних режимів, а значна частка викидів сформована в режимах зупинок, холостого ходу та інтенсивних прискорень [10–15]. Отже, сучасні наукові праці підтверджують доцільність переходу від стаціонарних і усереднених оцінок до інтегрованого прогнозування викидів на основі параметрів руху, режимів роботи дизеля і фактичних умов експлуатації.

Аналіз наукових праць, нормативних документів і міжнародних методик свідчить, що існуючі підходи забезпечують нормативне оцінювання та загальне моделювання емісійних показників, проте недостатньо враховують комплекс реальних експлуатаційних факторів, які визначають обсяги викидів дизельних тепловозів у конкретних умовах руху. Це зумовлює доцільність розроблення автоматизованої системи прогнозування експлуатаційних викидів на основі інтеграції тягових розрахунків, паливно-енергетичних параметрів і характеристик утворення забруднюючих речовин [1–4, 8–15].

Визначення мети та завдання дослідження.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та формування концептуальних засад автоматизованої системи прогнозування експлуатаційних викидів дизельних тепловозів, яка забезпечує визначення витрат палива і показників токсичності (NO_x , CO, PM, димність) у реальних умовах руху з урахуванням профілю колії, маси поїзда та швидкості руху.

Досягнення поставленої мети передбачає інтеграцію тягового розрахунку з моделлю роботи дизельного двигуна та емісійними характеристиками, що дасть змогу перейти від усереднених нормативних оцінок до режимно-часового прогнозу викидів у межах конкретного рейсу.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі наукові завдання:

- обґрунтувати теоретичний зв'язок між режимами роботи дизеля та формуванням викидів шкідливих речовин;
- визначити перелік вхідних параметрів, необхідних для прогнозування викидів у русі;
- сформувати концептуальну структуру автоматизованої системи прогнозування експлуатаційних викидів;
- встановити можливості використання прогнозних показників як критерію оцінювання якості технічного обслуговування і ремонту і як інструменту переходу до ремонту за технічним станом.

Реалізація зазначених завдань створює наукову основу для переходу від контрольних екологічних вимірювань у стаціонарних умовах до

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

системного управління викидами дизельної тяги в реальній експлуатації.

Основна частина дослідження.

Формування експлуатаційних викидів дизельного тепловоза є наслідком складної взаємодії тягової задачі, енергетичних характеристик силової установки та фізико-хімічних процесів згоряння палива. На відміну від стаціонарних умов, у реальному русі режими роботи дизеля визначені змінною потребою в тязі, що формується профілем колії, масою поїзда, швидкістю руху та динамікою керування. Саме тому теоретичний опис експлуатаційних викидів має ґрунтуватися на інтеграції тягового розрахунку з моделлю роботи двигуна та емісійними залежностями.

Тяговий розрахунок визначає необхідне тягове зусилля локомотива як суму сил опору руху, що включають опір коченню, аеродинамічний опір, опір на підйомах і в кривих. Маса поїзда та профіль колії формують часову змінність цього зусилля, а швидкість руху визначає співвідношення між тяговою силою та потужністю. Необхідна механічна потужність на ободі колеса через передавальні ланки трансформується в потужність, яку має розвивати дизельний двигун.

Зміна ухилу або маси поїзда викликає зміну навантаження, що позначається на корекції циклового подавання палива, тиску наддуву і тепловому стані камери згоряння. Отже, емісійні показники не є сталими характеристиками двигуна, а залежать від динаміки навантаження, сформованого умовами руху.

Формально цей зв'язок доцільно подати як послідовність перетворень «умови руху → режим роботи дизеля → витрати палива → викиди».

За наявності тягового зусилля $F_k(t)$ і швидкості руху $v(t)$ потужність на ободі колеса визначають співвідношенням

$$N_k(t) = F_k(t) \cdot v(t), \quad (1)$$

а необхідну ефективну потужність дизеля залежністю

$$N_e(t) = \frac{N_k(t)}{\eta_{tr}} + N_{aux}(t), \quad (2)$$

де η_{tr} – коефіцієнт корисної дії тягової передачі;

$N_{aux}(t)$ – потужність додаткових споживачів.

Тоді режим роботи дизеля може бути описаний вектором

$$R(t) = \{n(t), M_e(t), u(t), \dot{u}(t), S\}, \quad (3)$$

де $n(t)$ – частота обертання колінчастого вала;

$M_e(t)$ – ефективний крутний момент;

$u(t)$ – відносне навантаження;

$\dot{u}(t)$ – інтенсивність зміни навантаження;

S – сукупність параметрів технічного стану двигуна.

За таких умов миттєві витрати палива визначають як

$$G_f(t) = g_e(n(t), M_e(t), S) \cdot N_e(t), \quad (4)$$

а миттєву інтенсивність утворення j -ї забруднюючої речовини як

$$\dot{m}_j(t) = \Phi_j(R(t), G_f(t)), \quad j \in \{NO_x, CO, PM, C_xH_y\} \quad (5)$$

Відповідно, сумарний викид за рейс визначають інтегруванням:

$$M_j = \int_0^T \dot{m}_j(t) dt. \quad (6)$$

Така форма запису показує, що викиди є функцією не лише поточного навантаження, а і динаміки його зміни і технічного стану дизеля, тобто формуються в часовому просторі конкретного експлуатаційного режиму.

Питомі витрати палива дизельного двигуна визначені його характеристикою, яка встановлює зв'язок між ефективною потужністю, частотою обертання та кількістю впорскуваного палива. У зоні номінальних навантажень двигун зазвичай працює з мінімальними питомими витратами, тоді як у режимах часткового навантаження, або за частих перехідних процесів спостерігають зростання відносних втрат і зниження ефективності.

У реальній поїзній роботі дизель часто функціонує в змінних режимах, які не відповідають оптимальній точці характеристики. Часті зміни позицій контролера, короточасні перевантаження або тривала робота на малих навантаженнях призводять до зростання середніх питомих витрат палива. Збільшення витрат палива безпосередньо корелює зі зростанням викидів CO_2 , а також впливає на концентрації інших компонентів вихлопу через зміну умов згоряння.

Процес утворення основних забруднюючих речовин у дизельному двигуні визначено температурою згоряння, співвідношенням паливо-повітря, тиском у камері згоряння і тривалістю перебування продуктів реакції в зоні високих температур. Оксиди азоту (NO_x) формуються переважно за високих температур і надлишку кисню, тому їхня концентрація зростає в режимах підвищеного навантаження та високого теплового напруження.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Монооксид вуглецю (CO) є продуктом неповного згоряння і збільшується у випадках недостатнього перемішування, зниження температури або нестабільності процесу згоряння, що характерно для перехідних режимів і роботи на малих навантаженнях. Тверді частинки (PM) утворюються внаслідок локального перебогачення суміші та неповного окиснення вуглецевих структур, причому їхня інтенсивність суттєво зростає з перевантаженням двигуна або порушенням характеристик розпилу палива.

Димність, як оперативний експлуатаційний показник, відображає сумарний ефект сажоутворення та є чутливою до змін режиму подавання палива і повітря. У змінних режимах руху, коли навантаження дизеля швидко змінюється, можливі короткочасні піки димності, чого не фіксують під час стаціонарних випробувань.

Отже, формування експлуатаційних викидів є динамічним процесом, що визначено режимною траєкторією навантаження двигуна. Це підтверджує необхідність моделювання викидів як функції часу та зовнішніх експлуатаційних параметрів, а не як сталої питомої характеристики, отриманої в умовах стендових або реостатних випробувань.

Автоматизовану систему прогнозування експлуатаційних викидів дизельних двигунів тепловозів потрібно розглядати як інженерно-аналітичний контур, що перетворює інформацію про поїзну роботу в часові ряди режимів двигуна та відповідні часові ряди витрат палива і викидів забруднюючих речовин. Концептуально така система покликана усунути методичний розрив між квазістаціонарними оцінками, характерними для реостатних і стендових процедур, і реальними умовами руху, де визначальними є маршрутні фактори і режимні переходи. Центральною ідеєю є відтворення навантаження дизеля в кожний момент рейсу через тяговий розрахунок, після чого емісійні показники сформовані як функція отриманих режимів, а не як усереднена константа.

Вхідна інформація системи має відображати ті змінні, які детермінують потребу в тязі та, відповідно, вимоги щодо потужності. До таких параметрів належать цифровий профіль колії, що містить ухили, криві та, за можливості, дані про обмеження швидкості; маса поїзда, яка визначає інерційні та гравітаційні складові опорів руху; швидкість руху, яка задає динаміку реалізації тяги та впливає на співвідношення між тяговим зусиллям і потужністю. Оскільки швидкість є не лише наслідком тягового режиму, а й обмежена сигналізацією, графіком і режимами ведення поїзда, у системі доцільно передбачити два сценарії: прогнозування за заданим профілем швидкості (коли швидкість введена як вхідний часовий ряд) і прогнозування швидкості як результату тягової моделі за заданими обмеженнями і цільовими умовами руху.

Моделний принцип «рейс → режим → емісія» полягає в послідовному перетворенні задачі руху в параметри роботи силової установки. На першому етапі на основі профілю колії, маси та швидкості визначають сили опору руху і необхідне тягове зусилля, а також потужність на колісній парі як функцію часу або пройденої відстані. На другому етапі ця потужність, з урахуванням коефіцієнтів корисної дії тягової передачі та допоміжних втрат, трансформується у вимоги щодо ефективної потужності дизеля, а також у характерні параметри його режиму, зокрема рівень навантаження, частоту обертання і параметри паливободання. На третьому етапі витрати палива визначають за паливною характеристикою двигуна, після чого за емісійними залежностями обчислюють викиди NO_x , CO, твердих частинок і показники димності. Принциповим є те, що емісійна модель має бути прив'язана до режимних параметрів і може бути параметризована за результатами контрольних випробувань, але застосована до відновленої в часі експлуатаційної траєкторії навантаження (рисунок).



Рис. Концептуальна структура автоматизованої системи прогнозування експлуатаційних викидів

Запропонована система прогнозування експлуатаційних викидів набуває практичної цінності лише за умови її інтеграції з процесами технічного обслуговування та ремонту локомотивів. У цьому випадку прогнозні показники витрат палива, NO_x , CO , PM і димності розглядають не як ізольований результат моделювання, а як функціональний критерій оцінювання технічного стану дизеля та інструмент управління його життєвим циклом. Такий підхід допомагає розширити традиційну систему контролю, що ґрунтована на періодичних вимірюваннях під час реостатних випробувань, і перейти до постійного моніторингу екологічної ефективності в умовах реальної експлуатації.

У межах інтегрованої моделі екологічний критерій може бути використаний як кількісний показник якості виконаного ремонту. Після проведення ремонтних робіт прогнози розрахунки виконують для заданих типових умов руху, що включають конкретний профіль колії, масу поїзда і максимально допустимі швидкості. Отримані значення витрат палива і викидів порівнюють з еталонними або даними перед ремонтом. Зменшення прогнозних значень CO , PM і димності за одночасної стабілізації або зниження NO_x і питомих витрат палива свідчить про відновлення оптимального процесу згоряння та підтверджує якість виконаних робіт. Натомість збереження підвищених показників або їхня небажана зміна вказують на неповну ефективність ремонту чи необхідність додаткового регулювання паливної апаратури та системи повітроподачі.

Важливим напрямом є використання системи для прогнозування деградації параметрів у міжремонтний період. Знос циліндро-поршневої групи, погіршення характеристик форсунок, порушення герметичності клапанного механізму або нестабільність роботи турбонаддуву поступово змінюють умови сумішоутворення і згоряння. Це проявляється у зростанні відносних витрат палива, збільшенні CO та димності як індикаторів неповного згоряння, а також у варіативних змінах NO_x залежно від температурного режиму. Прогнозна система дає змогу відстежувати такі тенденції не лише за результатами разових вимірювань, а через моделювання типового рейсу з фіксованими умовами, що створює уніфіковану базу для порівняння в часі. Отже, екологічні показники перетворюються на ранні маркери погіршення технічного стану, які можуть сигналізувати про необхідність втручання ще перед виникненням помітного зниження тягових характеристик.

На основі накопичених прогнозних даних відкривається можливість переходу до ремонту за технічним станом. У цій концепції рішення про ремонт ухвалюють не за календарним графіком або пробігом, а за досягненням граничних значень комплексного екологічно-енергетичного показника, сформованого на базі витрат палива і токсичності у

визначених умовах руху. Такий підхід допомагає оптимізувати інтервали між ремонтами, зменшити непродуктивні простоя та водночас підтримувати екологічні характеристики локомотива в межах допустимих значень.

Із методичної точки зору інтеграція прогнозної системи з процесами технічного обслуговування передбачає формування структурованої відповідності між типовими відхиленнями технічного стану та змінами емісійних параметрів. Це може бути реалізовано у вигляді узагальненої таблиці відповідності, яка дає змогу інтерпретувати зміни прогнозних показників як прояв конкретних дефектів або розрегулювань. Така таблиця є аналітичним інструментом для інженерного персоналу та забезпечує зв'язок між математичною моделлю і практикою деповського ремонту.

Отже, інтеграція автоматизованого прогнозування з системою технічного обслуговування і ремонту створює передумови переходу від реактивного до проактивного управління технічним станом дизелів тепловозів, у якому екологічна складова стає рівноправним критерієм разом із надійністю та енергоефективністю.

Висновки.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що чинні національні та міжнародні методики визначення викидів дизельних двигунів тепловозів переважно орієнтовані на стаціонарні або квазістаціонарні режими роботи. Реостатні випробування і стендові процедури забезпечують контроль відповідності нормативним вимогам і допомагають отримати відтворювані показники димності та токсичності, однак не враховують динамічну структуру поїзної роботи. Факторні інвентаризаційні підходи, що застосовують для макрорівня, ґрунтовані на усереднених емісійних коефіцієнтах і не дають змогу відобразити індивідуальну режимну траєкторію конкретного рейсу.

Доведено, що формування експлуатаційних викидів дизельного тепловоза визначено сукупністю тягових і термодинамічних факторів, серед яких головну роль відіграють профіль колії, маса поїзда, швидкість руху. Саме ці параметри формують часову змінність навантаження двигуна, а отже, температуру згоряння, співвідношення паливо-повітря та умови утворення NO_x , CO , PM і показників димності. Ігнорування зазначених факторів у традиційних методиках обмежує можливість адекватного прогнозування екологічного впливу дизельної тяги в реальній експлуатації.

Наукова новизна запропонованого підходу полягає в інтеграції тягового розрахунку з моделлю роботи дизельного двигуна та емісійними характеристиками в єдину автоматизовану систему прогнозування. На відміну від існуючих методик, де викиди розглядають як сталі або усереднені величини, у роботі обґрунтовано розглядати їх як функції часу

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

та режиму навантаження протягом конкретного рейсу.

Крім того, розроблено підхід щодо використання прогнозних емісійних параметрів як індикаторів деградації технічного стану і критеріїв оцінювання якості ремонту, що створює методичні передумови переходу до ремонту за технічним станом із урахуванням екологічної складової.

Впровадження запропонованого підходу створює умови для використання екологічних показників як одного з критеріїв планування технічного обслуговування і ремонту, що сприяє зниженню перевитрат палива, мінімізації викидів шкідливих речовин і підвищенню енергоефективності локомотивного парку. Застосування системи у практиці експлуатації дасть змогу забезпечити обґрунтоване управління режимами руху, оптимізацію ремонтних інтервалів і підвищення екологічної відповідності дизельної тяги сучасним вимогам.

Список використаних джерел

1. ГСТУ 32.001-94. Викиди забруднюючих речовин з відпрацьованими газами тепловозних дизелів. Норми і методи визначення. Київ : Міністерство транспорту України, 1995. 18 с.
2. ISO 8178-1:2020. Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 1: Test-bed measurement systems of gaseous and particulate emissions. Geneva : International Organization for Standardization, 2020.
3. ISO 8178-4:2020. Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 4: Test cycles for different engine applications. Geneva : International Organization for Standardization, 2020.
4. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. Part B: sectoral guidance chapters. 1.A.3.c Railways 2023 [Electronic resource]. European Environment Agency, 2023. Access mode: EEA website. Accessed: 17.03.2026.
5. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. *Official Journal of the European Union*. 2008. L 152. P. 1–44.
6. Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants. *Official Journal of the European Union*. 2016. L 344. P. 1–31.
7. Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery. *Official Journal of the European Union*. 2016. L 252. P. 53–117.
8. Фалендиш А. П., Гатченко В. О., Клецька О. В. Аналіз підходів до розрахунку викидів забруднюючих речовин з відпрацьованими газами

дизелів тепловозів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 3 (233). С. 228–233.

9. Каграманян А. О., Рукавішніков П. В. Дослідження впливу основних факторів експлуатації дизелів тепловозів на викиди забруднюючих речовин. *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту*. 2010. Вип. 21. С. 94–106.

10. Vojtisek-Lom M., Jirků J., Pechout M. Real-World Exhaust Emissions of Diesel Locomotives and Motorized Railcars during Scheduled Passenger Train Runs on Czech Railroads. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, No. 6. Art. 582. DOI: 10.3390/atmos11060582

11. Lebedevas S., Dailydka S., Jastremskas V., Rapalis P. The influence of locomotive diesel engine transient operating modes on energy usage. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2015. Vol. 34. P. 219–229. DOI: 10.1016/j.trd.2014.10.011

12. Kim M.-K., Park D., Kim M., Heo J., Park S., Chong H. A Study on Characteristic Emission Factors of Exhaust Gas from Diesel Locomotives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17, No. 11. Art. 3788. DOI: 10.3390/ijerph17113788

13. Chong H. S., Lim Y., Lee J., Cho S., Park D. Investigation of real operation gaseous emissions from a diesel locomotive. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2022. Vol. 109. Art. 103372. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103372

14. Ahn K., Aredah A., Rakha H. A., Wei T., Frey H. C. Simple Diesel Train Fuel Consumption Model for Real-Time Train Applications. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 8. Art. 3555. DOI: 10.3390/en16083555

15. Urbański P., Huang Y., Gallas D., Zhou J. L., Merksisz J. Real-world assessment of the energy consumption and emissions performance of a novel diesel-electric dual-drive locomotive. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2024. Vol. 71. Art. 104017. DOI: 10.1016/j.seta.2024.104017

References

1. Ministerstvo transportu Ukrainy. (1995). *Vykydy zabrudniuiuchykh rehovyn z vidpratsovanymy hazamy teplovoznykh dyzeliv. Normy i metody vyznachennia* [Emissions of pollutants with exhaust gases of diesel locomotives. Norms and methods of determination] (HSTU 32.001-94).
2. International Organization for Standardization. (2020). *Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 1: Test-bed measurement systems of gaseous and particulate emissions* (ISO 8178-1:2020).
3. International Organization for Standardization. (2020). *Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 4: Test cycles for different engine applications* (ISO 8178-4:2020).

4. European Environment Agency. (2023). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. Part B: Sectoral guidance chapters. I.A.3.c railways 2023*.
5. European Parliament and Council of the European Union. (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. *Official Journal of the European Union, L 152*, 1–44.
6. European Parliament and Council of the European Union. (2016). Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants. *Official Journal of the European Union, L 344*, 1–31.
7. European Parliament and Council of the European Union. (2016). Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery. *Official Journal of the European Union, L 252*, 53–117.
8. Falendysh, A. P., Hatchenko, V. O., & Kletska, O. V. (2017). Analiz pidkhodiv do rozrakhunku vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn z vidpratovanymy hazamy dyzeliv teplovoziv [Analysis of approaches to calculating emissions of pollutants with exhaust gases of diesel locomotives]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia [Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University]*, (3(233)), 228–233.
9. Kahramanian, A. O., & Rukavishnikov, P. V. (2010). Doslidzhennia vplyvu osnovnykh faktoriv ekspluatatsii dyzeliv teplovoziv na vykydy zabrudniuiuchykh rehovyn [Study of the influence of main factors of diesel locomotive operation on pollutant emissions]. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu [Collection of Scientific Papers of the Donetsk Institute of Railway Transport]*, (21), 94–106.
10. Vojtisek-Lom, M., Jirků, J., & Pechout, M. (2020). Real-world exhaust emissions of diesel locomotives and motorized railcars during scheduled passenger train runs on Czech railroads. *Atmosphere, 11*(6), Article 582. <https://doi.org/10.3390/atmos11060582>
11. Lebedevas, S., Dailydka, S., Jastremskas, V., & Rapalis, P. (2015). The influence of locomotive diesel engine transient operating modes on energy usage. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 34*, 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.011>
12. Kim, M.-K., Park, D., Kim, M., Heo, J., Park, S., & Chong, H. (2020). A study on characteristic emission factors of exhaust gas from diesel locomotives. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 17*(11), Article 3788. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113788>
13. Chong, H. S., Lim, Y., Lee, J., Cho, S., & Park, D. (2022). Investigation of real operation gaseous emissions from a diesel locomotive. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 109*, Article 103372. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103372>
14. Ahn, K., Aredah, A., Rakha, H. A., Wei, T., & Frey, H. C. (2023). Simple diesel train fuel consumption model for real-time train applications. *Energies, 16*(8), Article 3555. <https://doi.org/10.3390/en16083555>
15. Urbański, P., Huang, Y., Gallas, D., Zhou, J. L., & Merksiz, J. (2024). Real-world assessment of the energy consumption and emissions performance of a novel diesel-electric dual-drive locomotive. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 71*, Article 104017. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104017>

PhD (Tech) A. Kagramanian, PhD (Tech) M. Rezunenko, Dr. Sc. (Econ) N. Panchenko, PhD (Tech) O. Oboznyi

DEVELOPMENT OF THE CONCEPT FOR AN AUTOMATED SYSTEM FOR PREDICTING DIESEL LOCOMOTIVE EMISSIONS WITH CONSIDERATION OF REAL OPERATING CONDITIONS

Abstract. *The article deals with forecasting pollutant emissions from diesel locomotives under real operating conditions. The study is relevant due to stricter environmental requirements for railway transport, the need to improve ecological assessment of traction rolling stock, and the limitations of existing standardized and inventory-based approaches that do not fully reflect route-specific operating variability. Current regulatory, methodological, and scientific approaches to emission assessment are analyzed, including national standards, international engine emission measurement procedures, European environmental requirements, and recent studies on real-world locomotive emissions.*

It is shown that existing methods are mainly focused on bench testing, certification, or aggregate inventory calculations and therefore are not sufficiently suitable for operational prediction of emissions during train movement. Special attention is given to the influence of traction load, fuel consumption, transient engine operation, train mass, route profile, and speed conditions on emission formation. On this basis, the need to develop an automated system for forecasting operational emissions of diesel locomotives is substantiated.

The proposed approach is based on integrating traction calculations, fuel and energy parameters, and diesel engine emission characteristics. This makes it possible to move from generalized estimates to route-specific prediction of environmental indicators for a particular locomotive under defined operating conditions.

The practical significance of the study lies in the possibility of using these principles for environmental assessment of locomotive operation, comparison of operating modes, support of energy-efficient train control, and further development of digital decision-support tools for railway transport. The obtained results may also be used as a methodological basis for improving environmental monitoring procedures.

Keywords: *locomotive, diesel engine, emission forecasting, pollutants, condition-based maintenance.*

Стаття надійшла 16.03.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 14.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.

Каграманян Артур Олександрович, канд.техн. наук, доцент, проректор із науково-педагогічної роботи, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-3520-4911. Тел.: +38 (050) 630-31-60. E-mail: kartal2@ukr.net.

Резуненко Марина Євгенівна, канд.техн. наук, доцент, завідувачка кафедри вищої математики та фізики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-2073-5242. Тел.: +38 (095) 320-52-89. E-mail: rezunenko@kart.edu.ua.

Панченко Наталія Георгіївна, д-р екон. наук, доцент, професор кафедри вищої математики та фізики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-2195-202X. Тел.: +38 (095) 076-40-37. E-mail: panchenko_n@kart.edu.ua.

Обозний Олександр Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023. Тел.: +38 (050) 303-45-59. E-mail: obozny@kart.edu.ua.

Kagramanian Artur, PhD (Tech.), associate professor, Vice-Rector for Research and Education, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-3520-4911.

Тел.: +38 (050) 630-31-60. E-mail: kartal2@ukr.net.

Rezunenko Maryna, PhD (Tech.), associate professor, Head of the Department of Higher Mathematics and Physics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-2073-5242. Тел.: +38 (095) 320-52-89. E-mail: rezunenko@kart.edu.ua.

Panchenko Natalia, Dr. Sc. (Econ), associate professor, Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-2195-202X. Тел.: +38 (095) 076-40-37. E-mail: panchenko_n@kart.edu.ua.

Oboznyi Oleksandr, PhD (Tech.), associate professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023. Тел.: +38 (050) 303-45-59. E-mail: obozny@kart.edu.ua.