

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК [629.424:62-585]-047.37

Б. Є. БОДНАР^{1*}, О. Б. ОЧКАСОВ^{2*}, Є. Б. БОДНАР^{3*}

^{1*}Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. + 38 (056) 733 19 01, ел. пошта b.e.bodnar@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

^{2*}Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта o.b.ochkasov@ust.edu.ua ORCID 0000-0002-7719-7214

^{3*}Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. + 38 (056) 733 19 61, ел. пошта e.b.bodnar @ ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6040-913X

Комплексне діагностування тепловозів з гідروпередачею: підходи та методи

Мета. Основною метою цієї статті є визначення узагальненого показника енергоефективності робочого циклу дизельного двигуна, який враховує комплексний вплив термодинамічних, механічних і гідродинамічних втрат, що виникають у процесі його експлуатації. Запропонований показник дозволяє оцінити зміни в роботі дизеля, зумовлені зниженням його теплової ефективності через погіршення процесу згоряння паливної суміші, зростанням механічних втрат, спричинених поступовим зношуванням деталей, а також появою додаткових несправностей у його системах і вузлах, що впливають на загальну працездатність двигуна. **Методика.** Для досягнення поставленої мети за результатами експериментальних досліджень запропоновано методику визначення ефективної потужності дизелів тепловозів ТГМ4 та ТГМ6–А з гідравлічною передачею УГП750–1200ПР, яка є інтегральним показником, що характеризує їх технічний стан та дозволяє оцінити якість виконання ремонту. **Результати.** На основі проведених експериментальних досліджень розроблено метод визначення ефективної потужності дизелів тепловозів із гідравлічною передачею УГП750–1200ПР під час короткочасного навантаження пусковим гідротрансформатором у режимі «вибігу» турбінного колеса. Метод базується на вимірюванні частоти обертання колінчастого вала дизеля та тиску наддувного повітря. Обробка експериментальних даних дозволила запропонувати методику оцінки ефективної потужності дизеля як інтегрального показника його технічного стану. Ця методика дає змогу визначати якість ремонту тепловозів ТГМ4 і ТГМ6–А з гідравлічною передачею УГП750–1200ПР, виявляти приховані несправності, оцінювати загальний технічний стан дизеля без розбирання, а також визначати необхідність ремонту або регулювання параметрів. **Наукова новизна.** У роботі отримали подальший розвиток методи діагностування силових установок тепловозів із гідравлічною передачею та визначення діагностичних параметрів, що характеризують їх технічний стан. **Практична значимість.** Використання запропонованої методики визначення ефективної потужності силових установок тепловозів із гідравлічною передачею УГП750–1200ПР дозволяє виявляти приховані несправності, оцінювати загальний технічний стан дизеля без його розбирання та визначати потребу в ремонті або регулюванні параметрів.

Ключові слова: тепловоз; гідравлічна передача; дизельний двигун; ефективна потужність; комплексне діагностування; технічний стан; післяремонтні випробування; ТГМ4; ТГМ6–А

Вступ

Тепловози з гідروпередачею відіграють ключову роль у залізничних перевезеннях, забезпечуючи ефективність та безперервність виконання робіт. Їх важливість полягає у здатності

надійно працювати в складних умовах, особливо на промислових маршрутах, де потрібна висока потужність та адаптивність до змінних умов експлуатації. Однак особливості конструкції тепловозів із гідравлічною передачею створюють додаткові виклики в забезпеченні надійної експлу-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

атації та своєчасного їх обслуговування. Традиційні методи діагностування силової установки тепловозів часто неможливо використати для тепловозів із гідравлічною передачею.

У сучасних умовах розвиток новітніх технологій дозволяє впроваджувати більш точні та інтегровані підходи до діагностування. Комплексне діагностування тепловозів із гідروпередачею, що поєднує методи моніторингу технічного стану, аналізу параметрів роботи та прогнозування можливих відмов, стає ключовим фактором у підвищенні ефективності та надійності залізничного транспорту.

Окремою задачею є проведення післяремонтних випробувань тепловозів. Актуальність проведення випробувань тепловозів із гідروпередачею після ремонту обумовлюється кількома ключовими факторами: безпека експлуатації, підтримка ефективності роботи, зменшення ризику повторних відмов, виконання нормативних вимог та економічна доцільність. У багатьох країнах випробування тепловозів після ремонту є обов'язковим етапом, передбаченим галузевими нормативами. Це дозволяє підтвердити їх відповідність технічним умовам та готовність до експлуатації.

Мета

Основною метою статті є визначення узагальненого показника енергоефективності робочого циклу дизельного двигуна, що враховує сукупний вплив термодинамічних, механічних і гідродинамічних втрат. Зміни цього показника відображають зниження теплової ефективності дизеля через погіршення процесу згоряння, зростання механічних втрат унаслідок зношування, а також появу інших несправностей у системах і вузлах дизеля.

Методика

Проведемо огляд методів випробувань силових установок дизелів тепловозів.

Інноваційні методи безрозбірного діагностування дизелів забезпечують не лише виявлення несправностей, а й їхнє своєчасне попередження, що дозволяє уникнути демонтажу чи повного розбирання дизеля, суттєво скорочуючи витрати часу та ресурсів. Сучасні методи

безрозбірного діагностування поділяють на тестові, які потребують тимчасового виведення двигуна з експлуатації, та функціональні, що дозволяють здійснювати моніторинг технічного стану дизеля без його вилучення з експлуатації. Функціональні методи забезпечують точне визначення поточного технічного стану дизеля, оцінку ступеня зношування критичних вузлів, а також встановлення необхідності проведення ремонтних заходів. Вони передбачають індивідуальне відстеження стану кожного конкретного двигуна протягом усього періоду його експлуатації.

Методика безрозбірного діагностування дизельних двигунів розвивається в різних напрямках, зокрема у сферах віброакустичного аналізу та діагностики за нерівномірністю обертання колінчастого вала. Кожен із цих підходів спрямований на підвищення точності та ефективності виявлення несправностей і контролю за технічним станом двигуна.

Віброакустична діагностика базується на аналізі вібраційних та акустичних сигналів, генерованих двигуном і його компонентами під час експлуатації. Зміни в технічному стані деталей двигуна, такі як зношування, люфти, тріщини або неправильне регулювання, викликають зміни у віброакустичних сигналах. Аналіз цих сигналів дозволяє ідентифікувати дефекти та прогнозувати можливі відмови.

У роботі [15] запропоновано використовувати вібраційні сигнали для виявлення пропусків запалювання в циліндрах. Визначення параметрів робочого циклу кожного циліндра дозволяє здійснювати корекцію та налаштування для забезпечення ефективної роботи двигуна, рівномірного розподілу навантаження між циліндрами, а також раннього виявлення потенційно небезпечних тенденцій у розвитку несправностей.

У дослідженнях [4, 17] запропоновано використовувати вібраційні сигнали для діагностики паливних форсунок і клапанного механізму за допомогою магнітних вібраційних датчиків. Випробування цих методів проведено на корабельному дизелі MAN 6S60MC–C, що дозволило підтвердити їхню ефективність у виявленні дефектів та оптимізації роботи двигуна.

Метод визначення механічних дефектів дизельного двигуна на основі аналізу шумових па-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

раметрів запропоновано в [7]. Цей підхід дозволяє здійснювати моніторинг технічного стану двигуна і формувати інформацію про залишковий ресурс агрегату на основі отриманих даних. Дослідження підкреслюють, що обробка та візуалізація акустичних сигналів у вигляді топологічних 3D–моделей може значно підвищити ефективність методів дистанційного моніторингу та забезпечити своєчасне виявлення потенційних відмов і несправностей.

У статті [18] проаналізовано сучасні методи діагностики суднових дизельних двигунів та запропоновано підходи на основі нейронних мереж для виявлення множинних несправностей. Традиційні методи, такі як аналіз мастила, вібраційний і тепловий аналіз, мають обмеження через високу вартість обладнання, складність монтажу та чутливість до зовнішніх факторів. Натомість автори пропонують використання штучного інтелекту для підвищення точності та ефективності діагностики. У дослідженні застосовано три алгоритми нейронних мереж: LM–BP, BR–BP та PNN. Найкращі результати для множинних несправностей досягнуто за допомогою LM–BP (88,89 % точності) з мінімальним часом обробки. BR–BP забезпечила стовідсоткову точність для одиничних несправностей, але була менш ефективною для множинних (55,56 %). PNN продемонструвала найшвидшу діагностику, однак мала найнижчу точність. Отримані результати демонструють перспективність нейронних мереж для поліпшення діагностики дизельних двигунів.

Гідравлічні передачі є поширеними як на автомобільному, так і на залізничному транспорті. Більшість методів випробування гідравлічних передач є стендовими. Завдання стендових випробувань полягає у визначенні технічного стану передачі та контролі відповідності стану передачі паспортним даним.

Робота [11] присвячена методам випробування та контролю гідромеханічної безступеневої трансмісії з використанням багатфункціонального стенда. Основну увагу приділено розробці стенда, який дозволяє виконувати багаторівневе тестування складових гідромеханічної безступеневої трансмісії. У рамках дослідження протестовано як механічну, так і гідравлічну складу системи, що дозволяє окремо оцінювати їхні характеристики, а також взаємодію між

ними. Тестовий стенд містить систему контролю навантаження та датчики для вимірювання швидкості, крутного моменту й тиску, що дає змогу оцінювати продуктивність гідропередачі у реальних умовах експлуатації. Запропонована багаторівнева методика тестування допомагає виявляти та усувати недоліки на ранніх етапах розробки, що скорочує цикл створення передачі та знижує витрати.

У статті [13] розглянуто метод динамічного співвідношення потужності для колісних навантажувачів на основі системи гідродинамічної трансмісії з реверсом потужності. Запропонований метод оптимізує передачу потужності, адаптуючи передавальне число відповідно до змінних робочих умов, що підвищує ефективність роботи навантажувача. Дослідження показало, що динамічне співвідношення потужності збільшує тягове зусилля, поліпшує ефективність трансмісії та знижує витрати пального.

Відсутність можливостей проведення післяремонтних випробувань тепловозів із гідравлічною передачею з навантаженням дизеля, через особливості конструкції призводить до того, що під час експлуатації дизелі можуть мати різний ступінь розрегулювання і, як правило, незадовільний перебіг робочого процесу. Крім цього, на техніко-економічні показники роботи дизеля суттєво впливає неузгодженість його характеристик та гідропередачі. Особливо така ситуація виникає після проведення капітальних ремонтів дизеля і гідропередачі. Це призводить до збільшення витрати дизельного палива, зниження надійності дизеля і тепловоза в цілому [8, 10].

Проведення випробувань тепловозів із гідравлічною передачею після ремонту забезпечує високу якість, безпеку та економічність експлуатації, що робить цю процедуру критично важливою для залізничного транспорту [3].

Багаторічний досвід експлуатації маневрових тепловозів із гідравлічною передачею потужності показує, що для оцінки технічного стану дизелів у процесі їх експлуатації, а також оцінки якості технічного обслуговування та ремонту тепловозів необхідно застосовувати комплексний діагностичний параметр, основу якого становить ефективна потужність дизеля [3, 6]. Разом з тим вимірювання ефективної потужності дизеля тепловоза з гідравлічною передачею є складним технічним завданням, яке було вирішене фахівцями

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

кафедри «Локомотиви» ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» [1, 2, 5].

На підставі проведених співробітниками кафедри «Локомотиви» ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» досліджень тепловозів ТГМ4 та ТГМ6А, які передбачали експериментальні перевірки та аналіз характеристик силової установки, розроблено спосіб проведення післяремонтних діагностичних випробувань тепловозів із гідравлічною передачею в умовах експлуатації [6, 12, 19]. З метою дослідження проявів несправностей для різних технічних станів дизеля та гідравлічної передачі використано імітаційне комп'ютерне моделювання [5, 11].

Оскільки розробка способів вимірювання ефективної потужності дизеля на тепловозах із гідравлічною передачею є актуальною, запропоновано метод, суть якого полягає у визначенні ефективної потужності за вимірюною частотою обертання колінчастого вала та абсолютним тиском наддуву повітря в циліндри дизеля. Під час проведення цих випробувань навантаження дизеля здійснено гідропередачею за її роботи на пусковому гідротрансформаторі в режимі «вибігу» турбінного колеса. Такий режим навантаження дозволив провести вимірювання максимального та середнього за часом ефективного тиску, запису індикаторної діаграми робочого процесу в циліндрах дизеля, тиску наддувного повітря, інших параметрів роботи силової установки та допоміжного обладнання тепловозів. На підставі експериментальних даних та аналізу параметрів роботи силової установки в такому режимі розроблено спеціальний метод визначення ефективної потужності дизеля в умовах експлуатації. Ефективна потужність є комплексним діагностичним параметром, оскільки інтегрує вплив різних систем і компонентів двигуна, а її зміна може вказувати на широкий спектр можливих несправностей.

Результати

Під час розробки методу визначення ефективної потужності дизеля використано статистичний аналіз точності моделювання систем тепловозів за методикою визначення довірчого інтервалу у вузловій точці, яка запропонована в роботах В. А. Федорця [8, 9].

Метод вузлових точок використовують для опису багатовимірної поверхні результативних ознак. Багатовимірну поверхню результативної ознаки Y складної систему описують у мультиплікативному вигляді [8, 9, 16]:

$$Y = \frac{1}{y_0^{n-1}} \prod_{i=1}^n f_i(x_i), \quad (1)$$

де Y – сукупність результативних ознак; $f_i(x_i)$ – однопараметричні функції.

Задача побудови результативної функції на ділянці визначення замінюється визначенням її у зоні «вузлової точки». При цьому розподіл похибок на ділянці визначення є невизначеним. Коефіцієнт, що знаходиться перед добутком функцій, визначають величиною функції у вузловій точці [16].

Для проведення досліджень, за результатами пасивного експерименту отримано трифакторну модель типу:

$$y = \frac{1}{y_0^2} (a_1 + b_1 x_1 + c_1 x_1^2) \cdot (a_2 + b_2 x_2 + c_2 x_2^2) \cdot (a_3 + b_3 x_3 + c_3 x_3^2). \quad (2)$$

Статистичний масив експериментальних даних має m точок. Вихідні y_i та наведені y_{nj} статистичні масиви подамо у формі табл. 1.

Таблиця 1

Загальний вигляд масиву експериментальних даних

Table 1

General view of the experimental data set

y_i	x_1	x_2	x_3	y_{nj}
y_1	$x_{1,1}$	$x_{2,1}$	$x_{3,1}$	y_{n1}
...	...	...	...	...
y_m	$x_{1,m}$	$x_{2,m}$	$x_{3,m}$	y_{nm}

Суть методу полягає в розрахунку ефективної потужності дизеля тепловоза з гідравлічною передачею на підставі отриманих у процесі випробувань тепловозів значень на всіх позиціях контролера машиніста, частоти обертання колінчастого вала дизеля (n_d) та абсолютного тиску

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

наддуваного повітря (P_{int}). для визначення ефективної потужності побудуємо граф параметрів робочого процесу дизеля (рис. 1).

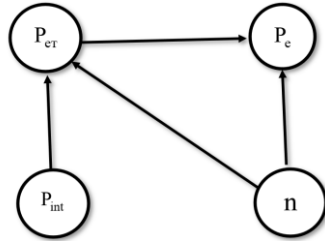


Рис. 1. Орієнтований граф параметрів робочого процесу дизеля:

P_{int} – тиск наддуваного повітря;
 (n) – частота обертання колінчастого валу дизеля;
 P_{em} – середній ефективний тиск в циліндрах дизеля;
 P_e – ефективна потужність дизеля

Fig. 1. Oriented graph of diesel engine operating process parameters:

P_{int} – inflatable air pressure;
 (n) – diesel crankshaft rotation frequency;
 P_{em} – average effective pressure in diesel cylinders;
 P_e – effective diesel power

Відповідно до наведеного на рис. 1 графа середній ефективний тиск повітря в циліндрах дизеля визначаємо на підставі наступного функціонального зв'язку:

$$P_{em} = P_{em.o} \cdot \bar{f}_{P_{em}}(P_{int}) \cdot \bar{f}_{P_{em}}(n) \quad (3)$$

де $P_{em.o}$ – значення середнього ефективного тиску у вузловій точці; $\bar{f}_{P_{em}}(P_{int})$ – відносна функціональна характеристика впливу P_{int} на P_{em} ; $\bar{f}_{P_{em}}(n)$ – відносна функціональна характеристика впливу n на P_{em} .

За вузлову точку, в цій методиці візьмемо точку, у якій паспортні дані відповідних значень параметрів (P_{int0} , n_0 , $P_{em.o}$) відповідають номінальному режиму роботи дизеля. У цій вузловій точці значення відносних функціональних характеристик впливу дорівнює 1, тобто $\bar{f}_{P_{em}}(P_{int}) = 1$, $\bar{f}_{P_{em}}(n) = 1$.

Функціональні характеристики $\bar{f}_{P_{em}}(P_{int})$, $\bar{f}_{P_{em}}(n)$ отримано за результатами обробки навантажувальних характеристик дизелів 8ЧН26/26

(тепловоз ТГМ6–А) та дизелів 6ЧН21/21 (тепловоз ТГМ4).

Значення ефективної потужності дизеля, виходячи із рис. 1, отримаємо з відомого відношення:

$$P_e = a \cdot P_{em} \cdot n. \quad (4)$$

Значення коефіцієнта a , що входить до виразу (4), визначаємо за виразом:

$$a = \frac{V_h \cdot i}{30 \cdot \tau}, \quad (5)$$

де V_h – робочий об'єм циліндра дизеля, m^3 ; i – кількість циліндрів; τ – тактність, для чотиритактного дизеля $\tau = 4$.

Аналітичну залежність функції $\bar{f}_{P_{em}}(P_{int}) = 1$ визначено на підставі обробки навантажувальних характеристик дизелів 6ЧН21/21 та 8ЧН26/26 з гідропередачею УГП750–1200ПР (тепловози ТГМ4 та ТГМ6–А) за методикою, наведеною в роботі [8], а результати розрахунків подано на рис. 2.

За результатами апроксимації дослідних даних отримано аналітичне рівняння регресії:

$$\bar{P}_{em} = -2,3684 + 33,134 \cdot P_{int} - 64,703 \cdot P_{int}^2. \quad (6)$$

Відповідність багатofакторних моделей експериментальним даним за наявності повторних дослідних даних оцінено за критерієм Фішера $F_p = 825$ та за коефіцієнтом кореляції $r = 0,995$, що підтверджує адекватність аналітичного рівняння регресії (6) дослідним даним.

У зв'язку з тим, що визначення потужності дизеля за такого способу випробувань та узгодження характеристик дизеля і гідропередачі проведено в номінальному режимі, рівняння (6) необхідно трансформувати на вузлову точку цього режиму. Після проведення розрахунків для номінального режиму, де тиск повітря наддуву для дизеля 6ЧН21/21 $P_{int} = 0,196$ МПа, отримаємо нове значення $\bar{P}_{em} = 1,6402$ і, поділивши коефіцієнти рівняння на нове значення, матимемо нове рівняння:

$$\bar{P}_{em} = -1,4439 + 20,201 \cdot P_{int} - 39,448 \cdot P_{int}^2. \quad (7)$$

Рівняння (7) розкриває аналітичний вигляд функції $\bar{f}_{P_{em}}(P_{int})$ що входить до рівняння (3).

З урахуванням символічних позначень рівняння (3) буде мати вигляд:

$$\bar{f}_{P_{em}}(P_{int}) = -1,4439 + 20,201 \cdot P_{int} - 39,448 \cdot P_{int}^2 \quad (8)$$

Узагальнену характеристику $\bar{f}_{P_{em}}(n)$ отримано аналогічним способом. Графічну залежність розрахунків впливу частоти обертання колінчатого вала дизеля 6ЧН21/21 на відносний середній ефективний тиск газів наведено на рис. 3.

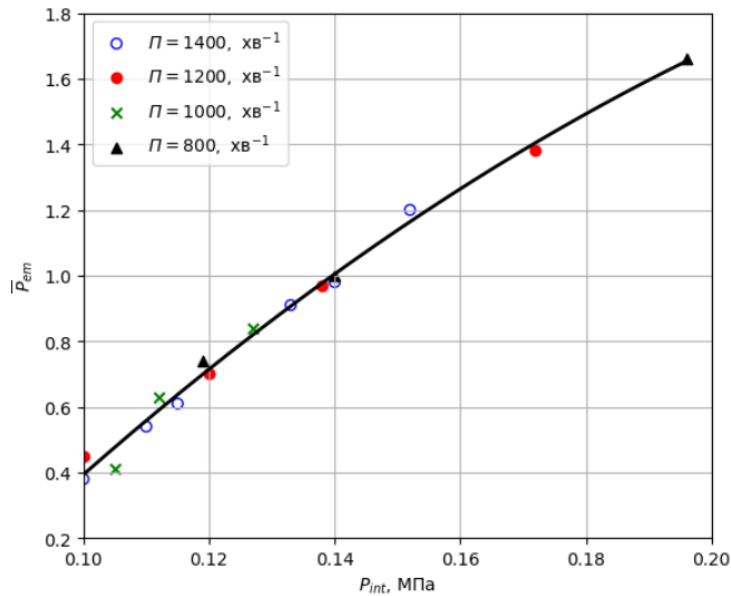


Рис. 2. Вплив тиску наддувального повітря P_{int} на відносну зміну середнього ефективного тиску в циліндрах P_{em} дизеля 6ЧН21/21

Fig. 2. Influence of charge air pressure P_{int} on the relative change in the average effective pressure in cylinders P_{em} of the 6CHN21/21 diesel engine

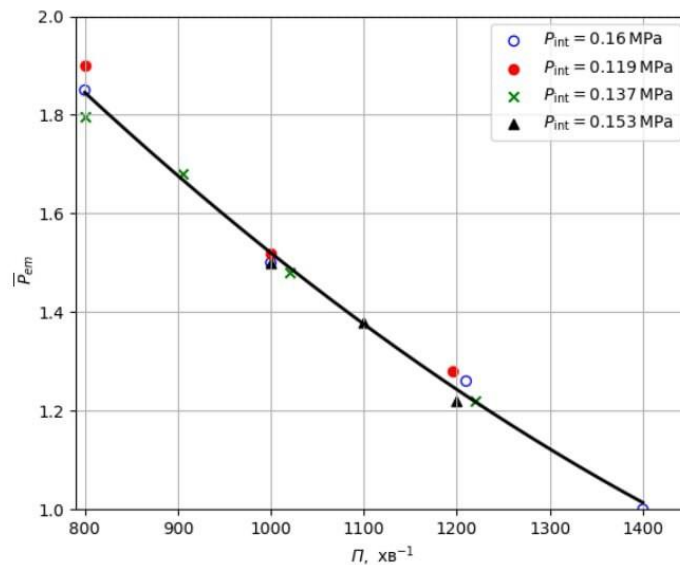


Рис. 3. Вплив частоти обертання колінчатого вала дизеля 6ЧН21/21 на відносний середній тиск газів

Fig. 3. Effect of the crankshaft speed of the 6CHN21/21 diesel engine on the relative average gas pressure

За результатами апроксимації експериментальних даних отримано рівняння регресії:

$$P_{em} = -3,391 - 2,306 \cdot 10^{-3} \cdot n + 4,308 \cdot 10^{-7} \cdot n^2. \quad (9)$$

З урахуванням значень тиску в вузловій точці рівняння (3) приведемо до наступного вигляду

$$P_{em} = 1.0836 \cdot (-1,4439 + 20,201 \cdot P_{int} - 39,448 \cdot P_{int}^2) \cdot (-3,391 - 2,306 \cdot 10^{-3} \cdot n + 4,308 \cdot 10^{-7} \cdot n^2). \quad (10)$$

Рівняння (10) дозволяє розраховувати значення середнього ефективного тиску в циліндрах дизеля 6ЧН21/21 в разі зміни частоти обертання колінчатого вала та тиску наддувального повітря.

Тоді з урахуванням значення коефіцієнта, визначеного за виразом (5) для дизеля 6ЧН21/21, формула для розрахунку ефективної потужності буде мати вигляд:

$$P_e = 0,3635 \cdot P_{em} \cdot n \quad (11)$$

Таким чином, вирази (10) та (11) дозволяють визначити ефективну потужність дизеля 6ЧН21/21 за відомих значень тиску наддувального повітря та частоти обертання колінчатого вала дизеля під час проведення випробувань тепловозів після поточних ремонтів в умовах експлуатації.

Ураховуючи, що для тепловоза ТГМ6–А використано такий самий метод обробки експериментальних даних, шляхом апроксимації навантажувальних характеристик дизеля 8ЧН26/26 та гідропередачі УГП750–1200ПР отримано таке аналітичне рівняння регресії:

$$\bar{P}_{em} = -1,087 + 17,749 \cdot P_{int} - 20,890 \cdot P_{int}^2 \quad (12)$$

Графічну залежність впливу тиску наддувального повітря на відносну зміну середнього ефективного тиску в циліндрах дизеля 8ЧН26/26 наведено на рис. 4.

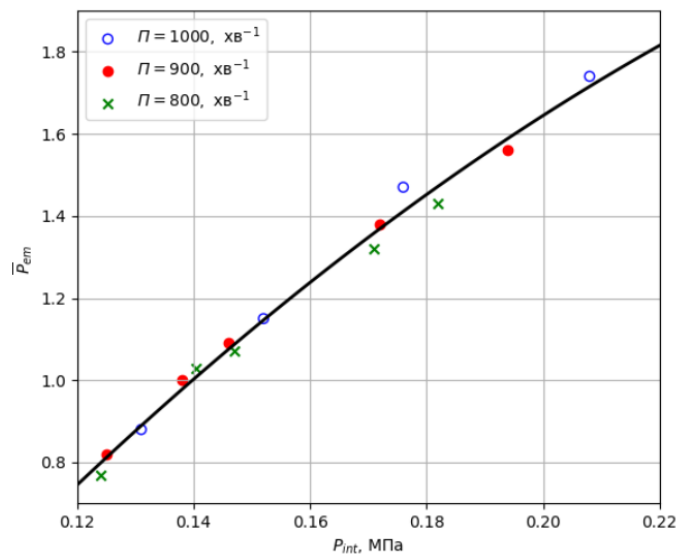


Рис. 4. Вплив тиску наддувального повітря P_{int} на відносну зміну середнього ефективного тиску в циліндрах $\bar{P}_{em}$ дизеля 8ЧН26/26

Fig. 4. Influence of charge air pressure P_{int} on the relative change in the average effective pressure in the cylinders $\bar{P}_{em}$ of the 8CHN26/26 diesel engine

З урахуванням значення тиску для номінального режиму роботи дизеля (0,206 МПа) рівняння (12) зведемо до такого вигляду:

$$\bar{P}_{em}(P_{int}) = -0,852 + 13,295 \cdot P_{int} - 20,898 \cdot P_{int}^2. \quad (13)$$

Узагальнену характеристику, наведену на рис. 5, можна описати рівнянням виду:

$$\bar{f}_{P_{em}}(n) = 2,384 - 1,107 \cdot 10^{-3} \cdot n - 2,77 \cdot 10^{-7} \cdot n^2. \quad (14)$$

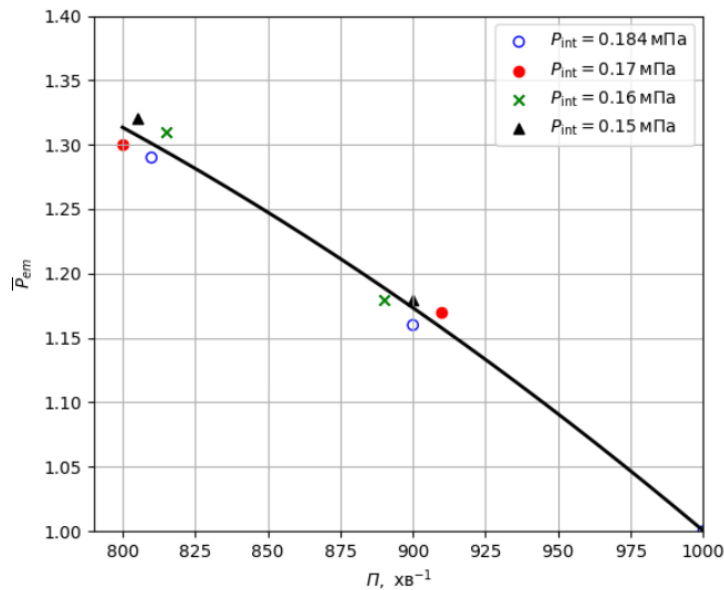


Рис. 5. Вплив частоти обертання колінчатого вала на відносну зміну середнього ефективного тиску в циліндрах $\bar{P}_{em}$ дизеля 8ЧН26/26

Fig. 5. Effect of crankshaft speed on the relative change in the average effective pressure in cylinders $\bar{P}_{em}$ of the 8CHN26/26 diesel engine

З урахуванням значення середнього ефективного тиску (0,96 МПа) у вузловій точці та аналітичного представлення функціональних залежностей (13) і (14) рівняння (2) можна звести до такого вигляду:

$$\bar{P}_{em} = 0.96 \cdot (-0.852 + 13.295 \cdot P_{int} - 20.898 \cdot P_{int}^2) \cdot (2.384 - 1.107 \cdot 10^{-3} \cdot n - 2.77 \cdot 10^{-7} \cdot n^2). \quad (15)$$

Формула для визначення ефективної потужності дизеля 8ЧН26/26 з урахуванням числового значення коефіцієнта (a) буде мати вигляд:

$$P_e = 0.9198 \cdot \bar{P}_{em} \cdot n. \quad (16)$$

Таким чином, вирази (15) і (16) дозволяють визначити ефективну потужність дизеля 8ЧН26/26 тепловоза ТГМ6–А в разі відомих значень тиску наддувального повітря та частоти обертання колінчатого вала дизеля. Для реалізації цього методу необхідно під час роботи силової установки в режимі «вибігу» (за короткочасного навантаження дизеля пусковим гідротрансформатором, постійно контролюючи температуру

мастила гідропередачі) заміряти тиск наддувального повітря і частоту обертання колінчатого вала дизеля. Якщо отримані значення підставити у формулу (10) – для тепловоза ТГМ4, або у формулу (16) – для тепловоза ТГМ6–А, отримаємо значення ефективної потужності дизелів. Ця потужність є комплексним діагностичним параметром дизеля, оскільки інтегрує вплив різних систем і компонентів на робочий процес, а її зміна вказує на широкий спектр можливих несправностей. Аналіз цього показника дозволяє своєчасно виявляти проблеми та підтримувати силову установку тепловозів у належному технічному стані.

Наукова новизна та практична значимість

Отримали подальший розвиток методи діагностування силових установок тепловозів із гідравлічною передачею та визначення діагностичних параметрів, що характеризують їх технічний стан.

Використання запропонованої методики визначення ефективної потужності дизелів тепловозів з гідравлічною передачею УГП750–1200ПР дозволяє виявляти приховані

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

несправності, оцінювати загальний технічний стан дизеля без його розбирання та визначати потребу в ремонті або регулюванні параметрів.

Висновки

Для реалізації наведеної методики за об'єкт дослідження було обрано дизелі 8ЧН26/26 тепловоза ТГМ6–А та 6ЧН21/21 тепловоза ТГМ4 з уніфікованою гідравлічною передачею УГП750–1200ПР. Вибір цих тепловозів обумовлений відсутністю можливостей проведення їх післяремонтних випробувань із навантаженням дизеля через особливості конструкції. Що призводить до того, що під час експлуатації їх дизелі можуть мати різний ступінь розрегулювання і, як правило, незадовільний перебіг робочого процесу. Крім цього, на техніко-економічні показники

роботи дизеля суттєво впливає неузгодженість характеристик дизеля та гідропередачі. Особливо така ситуація виникає після проведення капітальних ремонтів дизеля і гідропередачі. Це призводить до збільшення витрати дизельного палива, зниження надійності дизеля та тепловоза в цілому.

За результатами обробки експериментальних даних запропоновано методику визначення ефективної потужності дизеля, яка є інтегральним показником, що характеризує його технічний стан та дозволяє оцінити якість виконання ремонту тепловозів ТГМ4 та ТГМ6–А з гідравлічною передачею УГП750–1200ПР, виявляти приховані несправності, оцінювати загальний технічний стан дизеля без його розбирання та визначати потребу в ремонті або регулюванні параметрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боднар Б. Є., Бобирь Д. В., Капіца М. І. *Гідравлічні передачі локомотивів*. Дніпро : Дріант, 2021. 466 с.
2. Боднар Е. Б. *Підвищення експлуатаційної надійності локомотивів шляхом впровадження раціональної системи утримування* : дис. ... канд. техн. наук. УкрДУЗТ. Харків, 2004. 161 с.
3. Боднар Б. Е. *Теоретические основы, опыт создания систем испытания и диагностирования тепловозов с гидродинамической передачей* : дис. ... докт. техн. наук. Днепропетровский государственный технический университет ж/д транспорта. Днепропетровск, 1997. 366 с.
4. Варбанец Р. А. Параметрическая диагностика дизелей SBV6M540 и Pegaso 9156. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2006. № 8 (34). С. 144–148.
5. Капіца М. І., Калівода Я., Недужа Л. О., Очкасов О. Б., Черняев Д. В. *Комп'ютерне моделювання залізничних транспортних засобів: методичні вказівки до виконання практичних робіт, курсового та дипломного проектування; для студентів усіх форм навчання спеціальності «Залізничний транспорт»*. Дніпро : ДНУЗТ, 2018. 59 с.
6. Кузнецов Т. Ф., Федорец В. А., Лось И. И., Боднар Б. Е. *Способ определения мощности дизеля, связанного с гидроредукцией* : авторское свидетельство СССР № 1457477, МПК 01М 15/00 / заявл. 01.01.1988; опубл. 01.06.1989.
7. Мигаль В. П., Сілевич В. Ю., Мигаль Г. В. Інтегральна діагностика функціонального стану елементів транспортних систем на основі візуалізації шумових сигналів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. Т. 31. С. 102–108.
DOI: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-2/18>
8. Федорец В. А. Метод многофакторного исследования параметров процесса топливоподачи. *Двигателестроение*. 1982. № 11. С. 34–36.
9. Федорец В. А. Применение метода узловых точек при исследовании потерь на трение в двигателях. *Двигателестроение*. 1981. № 7. С. 50–51.
10. Bodnar B., Ochkasov O., Studenko O. Diesel Engines In-Place Diagnosis of Diesel Locomotives: Modern Approaches and Practical Application. *Proceedings of 28th International Scientific Conference. Transport Means 2024*. (Kaunas, 02–04 Oct. 2024). Kaunas University of Technology. Kaunas, 2024. P. 351–357.
DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.p351-357>
11. Bodnar B., Ochkasov O., Bobyr D., Korenyuk R., Bazaras Ž. Using the Self-Braking Method when the Post-Overhaul Diagnostics of Diesel-Hydraulic Locomotives. *Proceedings of 22nd International Scientific Conference. Transport Means 2018* (Trakai, 03–05 Oct. 2018). Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB «Lietuvos Geležinkeliai») [et al.]. Kaunas, 2018. Pt. II. P. 914–919.

12. Bondar B., Ockasov O., Petrenko V., Martishevskij M. Implementing Intelligent Monitoring of the Technical Condition of Locomotive Hydraulic Transmissions. *Transbaltica XIII: Transportation Science and Technology Proceedings of the 13th International Conference Transbaltica* (Vilnius, 15–16 Sept. 2022). Vilnius, 2023. P. 726–736. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_70
13. Dai H., Wan L., Zeng Q., Lu Z., Sun Z., Liu W. Method and Test Bench for Hydro-Mechanical Continuously Variable Transmission Based on Multi-Level Test and Verification. *Machines*. 2021. Vol. 9. Iss. 12. P. 358–369. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9120358>
14. Kan Y., Xie S., Yin Q., Jiang W., Yang M., Qian R. Dynamic power matching for wheel loader based on power reflux hydrodynamic transmission system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544070241261107>
15. Merksiz J., Waligórski M. Badania i symulacje dotyczące zastosowania metod wibroakustycznych do diagnozowania wypadania zapłonów w silnikach o zapłonie samoczynnym lokomotyw spalinowych. *Rail Vehicles*. 2008. Nr 3. S. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.53502/rail-139871>
16. Rimar M., Yeromin O., Larionov G., Kulikov A., Fedak M., Krenicky T., Gupalo O., Myanovskaya Y. Method of Sequential Approximation in Modelling the Processes of Heat Transfer and Gas Dynamics in Combustion Equipment. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 23. P. 11948. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122311948>
17. Varbanets R., Shumylo O., Marchenko A., Minchev D., Kyrnats V., Zalozh V., Aleksandrovska N., Brusnyk R., Volovyk K. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish Maritime Research*. 2022. Vol. 29. Iss. 4. P. 88–96. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>
18. Zhu G., Huang L., Yin J., Gai W., Wei L. Multiple faults diagnosis for ocean-going marine diesel engines based on different neural network algorithms. *Science progress*. 2023. Vol. 106. Iss. 4. P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1177/00368504231212765>
19. Zhukovytsky I. V., Kliushnyk I. A., Ochkasov O. B., Korenyuk R. O. Information-measuring test system of diesel locomotive hydraulic transmissions. *Science and Transport Progress*. 2015. No. 5 (59). P. 53–65. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/53159>

B. Y. BODNAR^{1*}, O. B. OCHKASOV^{2*}, Y. B. BODNAR^{3*}

^{1*}Dept. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 01, e-mail b.e.bodnar@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

^{2*}Dept. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 61, e-mail o.b.ochkasov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-7719-7214

^{3*}Dept. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 61, e-mail e.b.bodnar@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6040-913X

Comprehensive Diagnostics of Diesel Locomotives with Hydraulic Transmission: Approaches and Methods

Purpose. The main purpose of this article is to determine a generalized indicator of the energy efficiency of the diesel engine operating cycle, which takes into account the complex effect of thermodynamic, mechanical, and hydrodynamic losses that occur during its operation. The proposed indicator makes it possible to assess changes in diesel engine operation caused by a decrease in its thermal efficiency due to a deterioration in the combustion process of the fuel mixture, an increase in mechanical losses caused by the gradual wear of parts, as well as the appearance of additional malfunctions in its systems and components that affect the overall performance of the engine. **Methodology.** To achieve this goal, based on the results of experimental studies, we propose a method for determining the effective power of diesel engines of diesel locomotives TGM4 and TGM6–A with hydraulic transmission UGP750–1200PR, which is an integral indicator characterizing their technical condition and allowing to assess the quality of repair. **Findings.** Based on the experimental studies, a method for determining the effective power of diesel locomotives with a hydraulic transmission UGP750–1200PR during short-term loading by a starting torque converter in the turbine wheel «runaway» mode was developed. The method is based on measuring the diesel engine crankshaft speed and charge air pressure. The processing of experimental data allowed us to propose a method for estimating the effective power of a diesel engine as an integral indicator of its technical condition. This methodology makes it possible to determine the quality of repair of diesel locomotives TGM4 and TGM6–A with hydraulic transmission

UGP750–1200PR, to detect hidden faults, to assess the general technical condition of the diesel engine without disassembly, and to determine the need for repair or adjustment of parameters. **Originality.** The work further developed methods for diagnosing power plants of diesel locomotives with hydraulic transmission and determining diagnostic parameters characterizing their technical condition. **Practical value.** The use of the proposed methodology for determining the effective power of diesel locomotives with hydraulic transmission UGP750–1200PR allows detecting hidden faults, assessing the general technical condition of the diesel engine without disassembling it, and determining the need for repair or adjustment of parameters.

Keywords: diesel locomotive; hydraulic transmission; diesel engine; effective power; comprehensive diagnostics; technical condition; post-repair tests; TGM4; TGM6–A

REFERENCES

1. Bodnar, B. Ye., Bobyr, D. V., & Kapitsa, M. I. (2021). *Hidravlichni peredachi lokomotyviv*. Dnipro: Driant. (in Ukrainian)
2. Bodnar, E. B. (2004). *Pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti lokomotyviv shliakhom vprovadzhennia ratsionalnoi systemy utrymuvannia* (PhD dissertation). UkrSurt. Kharkiv, Ukraine. (in Ukrainian)
3. Bodnar, B. E. (1997). *Teoreticheskie osnovy, opyt sozdaniya sistem ispytaniya i diagnostirovaniya teplovozov sgidrodinamicheskoy peredachey* (Doctoral dissertation). Dnipropetrovsk State Technical University of Railway Transport. Dnipropetrovsk, Ukraine. (in Russian)
4. Varbanets, R. A. (2006). Parametricheskaya diagnostika dizeley SBV6M540 i Pegaso 9156. *Aerospace Technic and Technology*, 8(34), 144-148. (in Russian)
5. Kapitsa, M. I., Kalivoda, Ya., Neduzha, L. O., Ochkasov, O. B., Cherniaiev, D. V. (2018). *Komp'yuterne modeliuvannia zaliznychnykh transportnykh zasobiv: metodychni vkazivky do vykonannia praktychnykh robit, kursovoho ta dyplomnoho proektuvannia; dlia studentiv usikh form navchannia spetsialnosti «Zaliznychnyi transport»*. Dnipro: DNUZT. (in Ukrainian)
6. Kuznetsov, T. F., Fedorets, V. A., Los, I. I., & Bodnar, B. E. (1989). *Method for determining the power of a diesel engine connected to a hydraulic transmission* (Author's Certificate of the USSR No. 1457477). (in Russian)
7. Mygal, V. P., Silevytch, V. Yu., & Mygal, G. V. (2020). Integrated diagnostics of the functional state of the elements of transport systems based on visualization of the noise signal. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 2(3), 102-108. DOI: <https://doi.org/10.32838/tnu-2663-5941/2020.3-2/18> (in Ukrainian)
8. Fedorez, V. A. (1982). Metod mnogofaktornogo issledovaniya parametrov protsessa toplivopodachi. *Dvigatelstroeniye*, 11, 34-36. (in Russian)
9. Fedorez, V. A. (1981). The use of nodal point method at investigation of the friction loss in engines. *Dvigatelstroeniye*, 7, 50-51. (in Russian)
10. Bodnar, B., Ochkasov, O., & Studenko, O. (2024, Oct.). Diesel Engines In-Place Diagnosis of Diesel Locomotives: Modern Approaches and Practical Application. In *Proceedings of 28th International Scientific Conference. Transport Means 2024* (pp. 351-357). Kaunas University of Technology. Kaunas, Lithuania. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.p351-357> (in English)
11. Bodnar, B., Ochkasov, O., Bobyr, D., Korenyuk, R., & Bazaras, Ž. (2018, Oct.). Using the Self-Braking Method when the Post-Overhaul Diagnostics of Diesel-Hydraulic Locomotives. In *Proceedings of 22nd International Scientific Conference. Transport Means 2018* (Pt. II, pp. 914-919). Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB «Lietuvos Geležinkeliai») [et al.]. Kaunas, Lithuania. (in English)
12. Bondar, B., Ochkasov, O., Petrenko, V., & Martishevskij, M. (2023). Implementing Intelligent Monitoring of the Technical Condition of Locomotive Hydraulic Transmissions. In *Transbaltica XIII: Transportation Science and Technology Proceedings of the 13th International Conference Transbaltica* (pp. 726-736). Vilnius, Lithuania. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_70 (in English)
13. Dai, H., Wan, L., Zeng, Q., Lu, Z., Sun, Z., & Liu, W. (2021). Method and Test Bench for Hydro-Mechanical Continuously Variable Transmission Based on Multi-Level Test and Verification. *Machines*, 9(12), 358-369. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9120358> (in English)
14. Kan, Y., Xie, S., Yin, Q., Jiang, W., Yang, M., & Qian, R. (2024). Dynamic power matching for wheel loader based on power reflux hydrodynamic transmission system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544070241261107> (in English)

15. Merkiş, J., & Waligórski, M. (2008). Badania i symulacje dotyczące zastosowania metod wibroakustycznych do diagnozowania wypadania zapłonów w silnikach o zapłonie samoczynnym lokomotyw spalinowych. *Rail Vehicles*, 3, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.53502/rail-139871> (in Polish)
16. Rimar, M., Yeromin, O., Larionov, G., Kulikov, A., Fedak, M., Krenicky, T., Gupalo, O., & Myanovskaya, Y. (2022). Method of Sequential Approximation in Modelling the Processes of Heat Transfer and Gas Dynamics in Combustion Equipment. *Applied Sciences*, 12(23), 11948. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122311948> (in English)
17. Varbanets, R., Shumylo, O., Marchenko, A., Minchev, D., Kyrnats, V., Zallozh, V., Aleksandrovska, N., Brusnyk, R., & Volovyk, K. (2022). Concept of Vibroacoustic Diagnostics of the Fuel Injection and Electronic Cylinder Lubrication Systems of Marine Diesel Engines. *Polish Maritime Research*, 29(4), 88-96. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046> (in English)
18. Zhu, G., Huang, L., Yin, J., Gai, W., & Wei, L. (2023). Multiple faults diagnosis for ocean-going marine diesel engines based on different neural network algorithms. *Science Progress*, 106(4), 1-24. DOI: <https://doi.org/10.1177/00368504231212765> (in English)
19. Zhukovytskyi, I. V., Kliushnyk, I. A., Ochkasov, O. B., & Korenyuk, R. O. (2015). Information-measuring test system of diesel locomotive hydraulic transmissions. *Science and Transport Progress*, 5(59), 53-65. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/53159> (in English)

Надійшла до редколегії: 24.02.2025

Прийнята до друку: 23.06.2025