

Методика оцінки експлуатаційної економічності транспортних дизель-генераторів

Богаєвський О. Б.¹, Аргун Щ. В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. Розроблено методику оцінки впливу технічних засобів управління на підвищення експлуатаційної економічності тепловозних дизель-генераторів, які дозволяють ще на стадії впровадження енергозберігаючих заходів визначити ефективність дизель-генераторів в сталих режимах, перехідних режимах і в режимах холостого ходу, очікуваних в процесі експлуатації транспортного засобу. Запропонована методика може бути використана в якості дієвого теоретичного інструменту, а отримані результати можуть бути використані при обґрунтуванні застосування різних технічних систем контролю і управління.

Ключові слова: дизель-генераторна установка; локомотив; тепловоз; економія палива.

Вступ

Розвиток енергозберігаючих технологій є пріоритетним завданням для дослідників всього світу. Особливо актуальними ці технології є для різних видів транспорту та транспортної інфраструктури.

Розроблені останнім часом методи визначення параметрів забезпечення енергозберігаючої експлуатаційної роботи у встановлених та перехідних режимах, а також комплекси відповідних технічних засобів різних виробників дозволяють вести мову про комплексну енергозберігаючу технологію. Дана технологія заснована на застосуванні електронних засобів керування. Вона доволі ефективна як при використанні нових тепловозних дизелів, так і при модернізації існуючих дизелів в процесі капітальних ремонтів. Наявні показники підвищення економічності отримані експериментально, однак часто необхідно ще на стадії розробки перспективних засобів модернізації дизель-генераторів мати можливість теоретично оцінювати очікуваний результат і на його підставі приймати технічно та економічно виправдані рішення.

Аналіз публікацій

Підтвердженням актуальності даної роботи є

наявність великої кількості публікацій за цією тематикою, що знаходяться у відкритих джерелах.

Наприклад, автори роботи [1] пропонують підвищити економічні і екологічні характеристики автомобілів за рахунок впровадження старт-стоп системи. Використання даної пропозиції є перехідним етапом при відмові від автомобілів з ДВЗ на користь електромобілів. Як показують численні дослідження, електромобілі вважаються більш економічними, але для їх експлуатації необхідна відповідна інфраструктура, що включає в себе зарядні станції і локальні точки підзарядки [2].

Так як однією зі складових економічності автомобілів з електричним двигуном є надійність, то цьому питанню також приділяють величезне значення. Наприклад, публікації [3,4] присвячені надійності і безпеці експлуатації тягових акумуляторних батарей електромобілів, а в роботах [5,6] досліджуються способи підвищення якості тягових електродвигунів електромобілів.

На сьогодні існує проблема, пов'язана з необхідністю підвищення економічності залізничного транспорту, де експлуатуються локомотиви з дизель-генераторами потужністю від 1000 кВт до 3500 кВт. Цій проблемі приділяється також серйозна увага. Напри-

клад, в роботі [7] представлений аналіз методів модернізації регулятора частоти обертання локомотивних дизелів, а в публікації [8] показано, що тільки за рахунок модернізації регулятора частоти обертання, можливо знизити середні експлуатаційні витрати палива на 7 % – 10 %.

Також можливо досягти підвищення ефективності і надійності тепловоза модернізацією системи управління навантаженням енергоблоку [9].

Розроблені за останній час методи визначення параметрів енергозберігаючої експлуатаційної роботи в сталих і перехідних режимах, а також комплекти відповідних технічних засобів різних виробників, дозволяють вести мову про комплексну енергозберігаючу технологію. Вказана технологія спирається на застосування електронних засобів управління. Вона дуже ефективна як при використанні на нових тепловозних дизель-генераторах, так і при модернізації існуючих енергоустановок в процесі капітального ремонту.

Найвні в доступних джерелах показники підвищення економічності отримані експериментально, але часто ще на стадії розробки проектів модернізації дизель-генераторів з впровадженням перспективних засобів енергозбереження необхідно мати можливість теоретичної оцінки очікуваного результату і на цій підставі приймати технічно і економічно виправдані рішення.

Як зазначається в ряді досліджень, зокрема в [10–12], на економічність дизель-генератора тепловоза впливає ціла низка факторів, а саме: характер роботи (вантажний, пасажирський, маневровий); потужність; кліматичні умови; професійні навички машиніста тепловоза.

Для тепловозних дизель-генераторів характерна експлуатаційна робота з численними перемикаваннями режимів, причому переходи можуть бути як довгими, так і короткими в часі в залежності від швидкості руху, величини вантажу, профілю шляху, навичок машиніста і т.д. При цьому суттєві значення мають співвідношення між часом роботи на сталих режимах і питомою часткою часу перехідних режимів під час експлуатаційної роботи.

В цьому плані нечисленні публікації наводять цифри питомої ваги витрат палива в перехідних режимах. Вони складають 1 % – 2 % від витрат палива в сталих режимах у одних авторів і до 6 % – 10 % у інших [13]. Однак дані роботи [14] дозволяють зробити

припущення, що ця цифра може бути вищою за 10 %.

В якості оціночних показників режимів пропонується використовувати розподіл часу роботи за позиціями контролера машиніста, коефіцієнт використання потужності дизеля, кількість перемикань контролера машиніста і кількість накидань – скидань навантаження на дизель. Практично всі дослідники одностайні в тому, що значний об'єм часу тепловози працюють в режимі холостого ходу (від 38 % до 52 %) [15–17].

Існуючі на залізничному транспорті інтегральні показники розроблялись без урахування можливостей сучасних систем управління в формуванні як сталих, так і перехідних режимів. В зв'язку з цим на їх основі складно отримати оцінки, що дозволили б співставити ефективність енергозбереження систем управління різних виробників і відповідно реальний строк їх окупності в умовах експлуатації.

Мета та постановка задачі

Метою даної роботи є розробка методики оцінки впливу технічних засобів управління на підвищення експлуатаційної економічності тепловозних дизель-генераторів у відносному вигляді, які дозволяють ще на стадії підготовки до впровадження енергозберігаючих заходів визначити ефективність дизель-генераторів в сталих режимах, перехідних режимах і в режимах холостого ходу, очікуваних в процесі експлуатації транспортного засобу.

Для досягнення зазначеної мети в роботі необхідно розв'язати наступні задачі:

- провести аналіз методів підвищення ефективності залізничного транспорту;
- розробити методику узагальнених відносних оцінок;

Методика узагальнених відносних оцінок

Так як сучасні системи управління частотою і потужністю тепловозного дизель-генератора впливають на сталі та перехідні режими, а також на частоту холостого ходу, то отримані в процесі досліджень дані повинні дозволяти кількісно оцінювати ступінь підвищення енергозбереження на кожному з режимів роботи.

Зниження частоти холостого ходу є одним із суттєвих резервів підвищення енергозбереження. Кількісна оцінка впливу цього фактору була отримана під час експерименталь-

них досліджень і становить приблизно 1 % підвищення економічності на 1 % зниження частоти холостого ходу.

Розподіл часу роботи вказує на те, що на номінальному режимі тепловозні дизелі працюють обмежений час, а основний об'єм часу роботи припадає на роботу на середніх позиціях контролера машиніста, тобто на часткових навантаженнях. В цьому випадку тепловозний дизель з високим показником економічності на номінальному режимі не забезпечує очікуваної економічності в експлуатації через несприятливе розміщення його характеристики навантаження на сімействі універсальних характеристик дизеля.

Аналіз можливих взаємних розміщень сімейств універсальних і навантажувальних характеристик тепловозних дизелів дозволяє встановити, що за рахунок зміни їх взаємних розміщень економічність може бути покращена від 1 % до 5 %, особливо це стосується діапазону середніх частот обертання і потужності. Безумовно, це суттєвий резерв покращення енергозбереження в сталих режимах.

Моделювання реального експлуатаційного відрізка часу як розрахунковим шляхом, так і експериментальним неможливе. Тому є сенс зосередитись на отриманні відносних оцінок виходячи з загальновідомих співвідношень між витратами палива на сталих і перехідних режимах. При цьому відомі межі співвідношень необхідно дещо розширити задля більшої наочності демонстрації очікуваних перспектив енергозбереження.

Щоб розглянути методику отримання і використання узагальнених відносних оцінок необхідно скористатись загальновідомим виразом для середньо експлуатаційних ефективних витрат палива, що наведений в багатьох джерелах і зокрема в [18], а саме:

$$g_{\text{ср.е.}} = \frac{\sum B_{\text{ч пер.}} + \sum B_{\text{ч уст.}}}{A}, \quad (1)$$

де $\sum B_{\text{ч уст.}}$ – сума годинних витрат палива у сталих режимах; $\sum B_{\text{ч пер.}}$ – сума годинних витрат палива у перехідних режимах; A – загальна робота за умовний експлуатаційний цикл.

Для проведення аналізу у відносних величинах перетворимо цей вираз. Спочатку позначимо:

$$\sum B_{\text{ч пер.}} = K_{\text{пер.}} \cdot \sum B_{\text{ч уст.}} \quad (2)$$

де $K_{\text{пер.}}$ – коефіцієнт, що визначає частку витрат палива на перехідні процеси.

Позначимо через $\sum B_{\text{ч уст.1}}$ витрати палива в сталих режимах після впровадження енергозберігаючої технології, причому $\sum B_{\text{ч уст.1}} < \sum B_{\text{ч уст.}}$.

Вираз для $\sum B_{\text{ч уст.1}}$ можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} \sum B_{\text{ч уст.1}} &= \sum B_{\text{ч уст.}} - K_{\text{с уст.}} \cdot \sum B_{\text{ч уст.}} = \\ &= \sum B_{\text{ч уст.}} (1 - K_{\text{с уст.}}) \end{aligned}, \quad (3)$$

де $K_{\text{с уст.}}$ – коефіцієнт, що враховує зменшення витрат палива на сталих режимах.

Позначимо через $\sum B_{\text{ч пер.1}}$ витрати палива на перехідних режимах після впровадження енергозберігаючої технології, причому $\sum B_{\text{ч пер.1}} < \sum B_{\text{ч пер.}}$.

Тоді вираз для $\sum B_{\text{ч пер.1}}$ представимо в вигляді:

$$\begin{aligned} \sum B_{\text{ч пер.1}} &= \sum B_{\text{ч пер.}} - K_{\text{с пер.}} \cdot \sum B_{\text{ч пер.}} = \\ &= \sum B_{\text{ч пер.}} \cdot (1 - K_{\text{с пер.}}), \end{aligned} \quad (4)$$

де $K_{\text{с пер.}}$ – коефіцієнт, що враховує зменшення витрат палива в перехідних режимах.

З урахуванням введених позначень вираз для середньо експлуатаційних питомих ефективних витрат палива $g_{\text{ср.е.1}}$ після впровадження енергозберігаючої технології приймає вигляд:

$$\begin{aligned} g_{\text{ср.е.1}} &= \frac{(1 - K_{\text{с уст.}}) \sum B_{\text{ч уст.}}}{A} + \\ &+ \frac{K_{\text{пер.}} (1 - K_{\text{с пер.}}) \sum B_{\text{ч пер.}}}{A}. \end{aligned} \quad (5)$$

Очевидно, що $g_{\text{ср.е.1}} < g_{\text{ср.е.}}$. Тоді їх відношення приймає вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{g_{\text{ср.е.1}}}{g_{\text{ср.е.}}} &= \frac{(1 - K_{\text{с уст.}}) + K_{\text{пер.}} (1 - K_{\text{с пер.}})}{(1 + K_{\text{пер.}}) \sum B_{\text{ч уст.}}} \times \\ &\times \sum B_{\text{ч уст.}} \end{aligned} \quad (6)$$

або після перетворень:

$$\frac{g_{\text{ср.е.1}}}{g_{\text{ср.е.}}} = 1 - \frac{K_{\text{с уст.}}}{1 + K_{\text{пер.}}} - \frac{K_{\text{пер.}} \cdot K_{\text{с пер.}}}{1 + K_{\text{пер.}}}. \quad (7)$$

Отримано зручний для аналізу вираз, що дає змогу оцінити вплив на підвищення енер-

гозбереження технічних заходів для сталих і перехідних режимів. Складова $K_{c\text{уст.}}/(1+K_{\text{пер}})$ вказує ступінь підвищення енергозбереження в сталих режимах, а $(K_{\text{пер}} \cdot K_{\text{спер.}})/(1+K_{\text{пер}})$ – складова, яка вказує ступінь підвищення енергозбереження в перехідних режимах.

Проаналізуємо можливості підвищення енергозбереження на сталих режимах виходячи з того, що вираз для $g_{\text{ср.э.1}}$ можна представити у вигляді:

$$g_{\text{ср.э.1}} = g_{\text{ср.э.}} - \Delta g_{\text{еуст.}} - \Delta g_{\text{епер.}}, \quad (8)$$

де $\Delta g_{\text{еуст.}}$ – частка зменшення питомих витрат на сталих режимах; $\Delta g_{\text{епер.}}$ – частка зменшення питомих витрат в перехідних режимах.

Тоді в відносній формі отримаємо:

$$\frac{g_{\text{ср.э.1}}}{g_{\text{ср.э.}}} = 1 - \frac{\Delta g_{\text{еуст.}}}{g_{\text{ср.э.}}} - \frac{\Delta g_{\text{епер.}}}{g_{\text{ср.э.}}}. \quad (9)$$

Порівнюючи вирази (6) і (7) отримуємо:

$$\frac{\Delta g_{\text{еуст.}}}{g_{\text{ср.э.}}} = \frac{K_{\text{суст.}}}{1+K_{\text{пер.}}}; \quad (10)$$

$$\frac{\Delta g_{\text{епер.}}}{g_{\text{ср.э.}}} = \frac{K_{\text{пер.}} \cdot K_{\text{спер.}}}{1+K_{\text{пер.}}}. \quad (11)$$

Отримані відносні вирази дозволяють простим розрахунком оцінити потенційну долю енергозбереження на сталих і перехідних режимах за рахунок використання сучасних засобів управління.

В Таблиці 1 показана залежність підвищення енергозбереження на сталих режимах від $K_{c\text{уст.}}$ і $K_{\text{пер.}}$.

В Таблиці 2 показана залежність підвищення енергозбереження на перехідних режимах від $K_{c\text{пер.}}$ і $K_{\text{пер.}}$.

Проведені розрахунки з використанням отриманих відносних оцінок показують, що застосування сучасних систем управління дозволить підвищити енергозбереження для сталих режимів до 5 %, а для перехідних режимів до 3 %.

Реальні експлуатаційні випробування показали підвищення сумарної економічності різних дизель-генераторів вантажних магістральних тепловозів за рахунок застосування сучасних систем на 4...6 %, що свідчить про достовірність отриманих оцінок.

Таблиця 1. Залежність $\Delta g_{\text{суст.}}/g_{\text{ср.э.}}$ від $K_{c\text{уст.}}$ і $K_{\text{пер.}}$, %

$K_{c\text{уст.}}$, %	$K_{\text{пер.}}$, %				
	1	5	10	15	20
1	1	1,0	1,0	0,9	0,8
2	2	2,0	1,9	1,8	1,7
3	3	2,9	2,8	2,7	2,5
4	4	3,9	3,6	3,5	3,3
5	5	4,8	4,6	4,4	4,2

Таблиця 2. Залежність $\Delta g_{\text{спер.}}/g_{\text{ср.э.}}$ від $K_{c\text{пер.}}$ і $K_{\text{пер.}}$, %

$K_{c\text{пер.}}$, %	$K_{\text{пер.}}$, %				
	1	5	10	15	20
5	0,05	0,3	0,5	0,7	0,8
10	0,10	0,5	1,0	1,3	1,7
15	0,15	0,7	1,4	2,0	2,5
20	0,02	1,0	1,9	2,6	3,4

Запропонований метод відносних оцінок може бути застосованим для аналізу потенційного підвищення експлуатаційної економічності дизель-генераторів маневрових тепловозів, парк яких є значним споживачем дизельного палива на залізничних підприємствах, підприємствах гірничодобувної та металургійної галузей промисловості практично у всіх країнах. Експлуатаційна робота таких дизель-генераторів характеризується значним часом їх роботи на малих навантаженнях, холостому ході і перехідних режимах. Визначення впливу на зниження витрат палива тепловоза від впровадження технічних систем доцільно виконати розрахунковим способом, так як експериментальний підхід потребує суттєвих матеріальних і часових затрат. Особливо значними робочі і часові затрати у випадку дослідження роботи маневрових тепловозів.

При розрахунковому дослідженні роботи маневрового тепловоза на експлуатаційних режимах важливим питанням є вибір тривалості у часі експлуатаційного циклу. Для тепловозів в експлуатації характерною є робота з багатьма переключеннями з режиму на режим. При цьому на сталому режимі тепловоз може працювати обмежений час, а інколи навіть не встигає затриматись на якомусь зі сталих режимів і відразу ж переводиться на інший режим.

Необхідно аналізувати роботу тепловоза у всьому експлуатаційному циклі, враховуючи як сталі, так і перехідні режими при розгоні і гальмуванні. При цьому велике значення має співвідношення часової тривалості сталих і перехідних процесів у всьому експлуатаційному циклі. В [18] пропонується під експлу-

таційним циклом розуміти деяку сукупність сталих і перехідних режимів тепловоза впродовж відносно короткого (декілька хвилин) відрізка часу, яка багатократно повторюється за весь період виконання тепловозом конкретної технологічної операції. В експлуатаційному циклі відображаються не тільки співвідношення між окремими режимами за часом, але і їх послідовність, тривалість в часі і частота змін.

В [18] запропоновано для розрахункових досліджень умовний експлуатаційний цикл, тривалістю близько 11 хв., який наведено на рис. 1, і цикл штовхання довжиною 50 с.

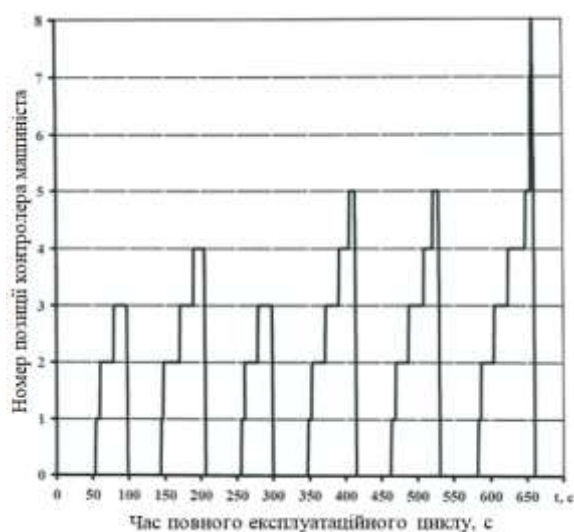


Рис. 1. Послідовність включення позицій контролера під час умовного експлуатаційного циклу

При складанні умовного експлуатаційного циклу тривалістю близько 11 хв. враховувались багатолітні дослідження експлуатаційних режимів маневрових тепловозів, що проводились Уральським відділенням НДІ залізничного транспорту.

Кількість змін режимів (переключення позицій контролера) і відносний час перебування тепловозного дизеля на кожній позиції контролера машиніста відповідають середньостатистичним значенням цих змінних величин в експлуатації. Як було зазначено вище для вантажних магістральних тепловозів скласти подібний умовний експлуатаційний цикл практично неможливо.

В таблицях 3 і 4 більш точно показано час, через який включається та чи інша позиція контролера тепловоза і якій номінальній частоті відповідають ці позиції для циклів довжиною 11 хв. і 50 с.

Таблиця 3. Значення часу, через який послідовно включається чергова позиція контролера машиніста для циклу 11хв

№ позиції контролера машиніста	Час дії режиму позиції, τ , с	Частота обертання колінвала, n , хв^{-1}
0	53,8	330
1	6,22	350
2	18,92	380
3	19,28	410
0	46,88	330
1	4,22	350
2	22,92	380
3	18,28	410
4	15,77	460
0	49,89	330
1	5,23	350
2	18,91	380
3	19,28	410
0	48,88	330
1	5,22	350
2	18,92	380
3	19,29	410
4	14,77	460
5	8,68	510
0	48,88	330
1	6,22	350
2	17,91	380
3	20,29	410
4	13,77	460
5	8,69	510
0	51,89	330
1	5,23	350
2	17,92	380
3	19,08	410
4	13,77	460
5	9,69	510
6	7,92	560
7	1,98	660
8	1,32	750
РАЗОМ	659,92	-

Сумарні витрати палива в експлуатаційній роботі маневрового тепловоза можна представити наступним виразом:

$$B_{\Sigma} = B_{\Gamma} + B_{\text{ХХ}} + B_{\text{ЗАП}}, \quad (12)$$

де B_{Γ} – витрати палива на режими тяги; $B_{\text{ХХ}}$ – витрати палива на режимі холостого ходу; $B_{\text{ЗАП}}$ – витрати палива на запуски двигуна.

Складові виразу (12) можна визначити по відомим формулам:

$$B_{\Gamma} = g_{\Gamma} \cdot t_{\Gamma}; \quad B_{\text{ХХ}} = g_{\text{ХХ}} \cdot t_{\text{ХХ}}; \quad B_{\text{ЗАП}} = g_{\text{ЗАП}} \cdot n, \quad (13)$$

де g_T , g_{XX} , $g_{ЗАП}$ – середньоексплуатаційні витрати палива відповідно на режими тяги, холостого ходу і запуск дизеля; t_T , t_{XX} – час роботи відповідно на режимах тяги і холостого ходу; n – кількість запусків дизеля маневрового тепловозу за зміну.

Таблиця 4. Значення часу, через який включається чергова позиція контролера для циклу 50 с

№ позиції контролера машиніста	Час дії режиму позиції, τ , с	Частота обертання колінвалу, n , хв^{-1}
0	10	330
3	5	410
5	5	510
8	10	750
4	5	460
0	15	330

Переважна кількість маневрових тепловозів промислових підприємств і підприємств залізниці не обладнані сучасними електронними засобами управління подачею палива. Тому основний напрямок зниження витрат палива спрямовано на зменшення показника t_{XX} до технологічно необхідного значення.

Величина t_{XX} є найважливішим параметром для локомотивних систем типу «старт-стоп». Ця величина також є залежною від ряду параметрів тепловозу таких як стан акумуляторної батареї, температурні показники, тиск в гальмівній системі та ін.

У взаємозв'язку з t_{XX} знаходиться параметр $B_{ЗАП}$, при цьому зменшення t_{XX} призводить до збільшення числа запусків n , а значить до збільшення складової $B_{ЗАП}$ в формулі (12).

Питання визначення $B_{ЗАП}$ потребує окремого дослідження, тому в роботі будуть отримані оцінки, що дозволяють визначити ступінь впливу на зниження витрат палива за рахунок зміни параметрів, які є складовими B_T и B_{XX} в формулі (12), яку пропонується привести до вигляду:

$$B_{\Sigma} = B_T + B_{XX} \quad (14)$$

або через складові:

$$B_{\Sigma} = g_T \cdot t_T + g_{XX} \cdot t_{XX} = g_{XX} \cdot t_{XX} \cdot (1 + K_1), \quad (15)$$

де $K_1 = g_T \cdot t_T / g_{XX} \cdot t_{XX}$ (аналогічний підхід був використаний в формулі (2) цієї роботи).

Для реалізації розрахункового методу необхідна наявність комп'ютерної моделі сис-

теми управління дизель – генератором, яка б дозволила здійснити моделювання процесів управління частотою і навантаженням дизель-генератора сучасною системою управління (електронним регулятором) і звичайним гідромеханічним регулятором в умовному експлуатаційному циклі.

На підставі порівняння можна буде зробити висновок про ступінь впливу електронного регулятора на зниження витрат палива.

Така комп'ютерна модель була розроблена і підтвердила свою працездатність при дослідженні впливу регулюючих параметрів електронного регулятора на паливну економічність роботи тепловозного дизель – генератора в перехідних процесах [19].

Аналізуючи вираз (14) можна відмітити, що якщо локомотив обладнано гідромеханічною системою управління, то параметр t_{XX} може змінюватись як машиністом, що на свій розсуд визначає час роботи тепловоза на холостому ходу, так і за допомогою системи, що подібна до системи «старт-стоп» в автомобілях [1].

У локомотивів з електронною системою управління можливо також впливати на зниження параметрів g_T і g_{XX} .

Для подальшого аналізу введемо наступні коефіцієнти: K_{tx} – коефіцієнт зниження часу холостого ходу, ≤ 1 ; K_{gx} – коефіцієнт зниження витрат палива на холостий хід, ≤ 1 ; K_{gt} – на коефіцієнт зниження витрат палива тягу, ≤ 1 .

Мінімальне значення коефіцієнтів визначається на основі вимог експлуатаційної роботи маневрового тепловоза, технічного стану тепловозного дизель-генератора.

Отримаємо вирази, які дозволять оцінити вплив на зниження витрат палива трьох факторів: зменшення часу t_{XX} , зниження витрат палива g_{XX} и g_T .

У відносній формі вираз для зниження витрат палива від зменшення часу t_{XX} має вигляд, %:

$$\Delta_{tx} = \frac{g_{XX} t_{XX} (1 + K_1) - g_{XX} t_{XX} (K_{tx} + K_1)}{g_{XX} t_{XX} (1 + K_1)} 100 \quad (16)$$

або після перетворень, %:

$$\Delta_{tx} = \frac{1 - K_{tx}}{1 + K_1} \cdot 100. \quad (17)$$

Вираз для зменшення витрат палива у випадку зниження g_{xx} відразу представимо в формі після відповідних перетворень, %:

$$\Delta_{g_x} = \frac{1 - K_{g_x}}{1 + K_1} \cdot 100. \quad (18)$$

Із отриманих виразів слідує, що ступінь зниження t_{xx} і зниження g_{xx} мають однаковий вплив на кінцеве зменшення витрат палива при роботі на холостому ході.

Випадок одночасного впливу на витрату палива зменшення g_{xx} і t_{xx} можна відобразити наведеним виразом, %:

$$\Delta_{xx} = \frac{1 - K_{g_x} \cdot K_{t_x}}{1 + K_1} \cdot 100. \quad (19)$$

Скоротити час виконання тягової (корисної) роботи не представляється можливим, однак можна отримати вирази у відносній формі, що дозволяють проаналізувати вплив на зменшення витрат палива за рахунок зниження величини g_T .

У відносній формі вираз для зниження витрат палива від зменшення g_T має вигляд, %:

$$\Delta_{g_T} = \frac{g_{xx}t_{xx}(1 + K_1) - g_{xx}t_{xx}(1 + K_1K_{g_x})}{g_{xx}t_{xx}(1 + K_1)} \cdot 100 \quad (20)$$

або після перетворень, %:

$$\Delta_{g_T} = \frac{K_1(1 - K_{g_T})}{1 + K_1} \cdot 100. \quad (21)$$

Таблиця 6. Залежність Δ_{xx} від K_{g_x} , K_{t_x} і K_1

K_{t_x}	$\Delta_{xx}, \%$									
	$K_{g_x}, K_1=1,0$					$K_{g_x}, K_1=0,8$				
	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95
0,99	1,0	1,5	2,0	2,48	2,98	1,1	1,66	2,2	2,76	3,3
0,98	1,5	1,98	2,47	2,96	3,45	1,66	2,2	2,76	3,3	3,83
0,97	1,98	2,47	2,96	3,44	3,92	2,2	2,76	3,3	3,83	4,36
0,96	2,48	2,96	3,44	3,92	4,4	2,76	3,3	3,83	4,36	4,89
0,95	2,98	3,44	3,92	4,4	4,88	3,3	3,83	4,36	4,89	5,42

В Таблиці 7 наведено числовий матеріал досліджень по виразу (21).

Моделювання процесів в тязі показало, економія залежить від характеру зміни машиністом позицій контролера. Наприклад, якщо зміна здійснюється від 0 позиції до 8 по алгоритму в таблиці 3, то економія на цьому відрізку складе 1,67 %, а якщо по алгоритму в таблиці 4, то складе вже 8,4 % на цьому відрізку роботи. Якщо перехід від

Отримані вирази (17)-(19) і (21) дозволяють у відносній формі оцінити вплив факторів, що розглядаються в роботі, на підвищення економічності локомотива в експлуатації. Використання комп'ютерної моделі, наведеної в [7], дозволили визначити величину K_1 , тобто співвідношення затрат палива холостого ходу і режимів тяги в умовному експлуатаційному циклі, часові і частотні значення якого наведено в Таблиці 3.

Це співвідношення склало величину 1,2. Так як наведений умовний експлуатаційний цикл демонструє по всій видимості технологічно обґрунтовані витрати часу (і палива) на холостий хід і тягу в процесі реальної маневрової роботи, то величину K_1 вибирати більшою за 1,2 не має практичного сенсу. Тому для теоретичного дослідження обрані значення $K_1 = 1,0$ і $K_1 = 0,8$, тобто доля холостого ходу більша за технологічно необхідні значення

В Таблиці 5 наведено числовий матеріал досліджень по виразах (17) і (18).

Таблиця 5. Залежність Δ_{g_x} і Δ_{t_x} від K_{g_x} , K_{t_x} і K_1

K_{g_x}, K_{t_x}	Δ_{g_x} і $\Delta_{t_x}, \%$	
	$K_1=1,0$	$K_1=0,8$
0,99	0,5	0,55
0,98	1,0	1,1
0,97	1,5	1,67
0,96	2,0	2,22
0,95	2,5	2,78

В таблиці 6 наведено числовий матеріал досліджень за виразом (19).

0 позиції до 8 буде відбуватись стрибкоподібно, то економія може досягти 16 %. Тому в таблиці 7 діапазон зміни K_{g_T} може бути і більшим.

З числового матеріалу таблиць 5 – 7 слідує, що зниження значення K_1 с 1,0 до 0,8 (тобто на 20 %) призводить до збільшення проценту економії палива за рахунок складових K_{g_x} і K_{t_x} приблизно на 10 % і до зниження витрат палива за рахунок складової K_{g_T} приблизно на на 11 %.

Таблиця 7. Залежність Δ_{gT} від K_{gT} і K_1

K_{gT}	$\Delta_{gT}, \%$	
	$K_1=1,0$	$K_1=0,8$
0,99	0,5	0,44
0,98	1,0	0,89
0,97	1,5	1,33
0,96	2,0	1,78
0,95	2,5	2,2

Необхідно відмітити, що зниження загальних витрат палива при маневровій роботі за рахунок зменшення g_T і K_{XX} забезпечується за рахунок впровадження технічних засобів (електронних систем управління), а зниження за рахунок зменшення t_{XX} реалізується за рахунок застосування системи типу «старт–стоп» в автомобілі.

При цьому необхідно враховувати, що технологічно обґрунтований час холостого ходу не може бути меншим, ніж 50-60 с. Реальний технологічно обґрунтований час холостого ходу може бути визначений в результаті додаткового аналітичного дослідження або експериментальним шляхом. В той же час очевидно, що на його величину впливає цілий ряд факторів, зокрема стан акумуляторної батареї.

Висновки

Отримані в роботі прості вирази дозволяють без проведення дуже вартісного за часом і матеріальними ресурсами експериментального дослідження оцінити у відносній формі ступінь впливу електронних технічних систем на підвищення експлуатаційної економічності магістральних і маневрових тепловозів. Причому в випадку магістрального локомотива оцінюється очікувана ефективність від використання лише систем управління частотою і потужністю (електронного регулятора), а у випадку маневрового локомотива відносні оцінки дозволяють оцінювати очікувану ефективність від одночасного застосування двох систем управління: системи типу «старт–стоп» і електронного регулятора.

Розроблена методика відносних оцінок може бути використана в якості достатньо дієвого теоретичного інструмента, а отримані результати можуть бути використані для обґрунтування використання різних технічних систем управління і контролю.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Dvadenko, V., Arhun, S., Bogajevskiy, A., & Ponikarovska, S. (2018). Improvement of economic and ecological characteristics of a car with a start-stop system. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 10(3), 209–222. <https://doi.org/10.1504/IJEHV.2018.097377>
2. Patlins, A., Hnatov, A., Arhun, S., & Dzyubenko, O. (2019). Design and research of constructive features of paving slabs for power generation by pedestrians. *Transportation Research Procedia*, 40, 434–441. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.063>
3. Gandoman, F. H., Jagemont, J., Goutam, S., Gopalakrishnan, R., Firouz, Y., Kalogiannis, T., Omar, N., & Van Mierlo, J. (2019). Concept of reliability and safety assessment of lithium-ion batteries in electric vehicles: Basics, progress, and challenges. *Applied Energy*, 251, 113343.
4. Shu, X., Yang, W., Guo, Y., Wei, K., Qin, B., & Zhu, G. (2020). A reliability study of electric vehicle battery from the perspective of power supply system. *Journal of Power Sources*, 451, 227805.
5. Migal, V., Lebedev, A., Shuliak, M., Kalinin, E., Arhun, S., & Korohodskiy, V. (2021). Reducing the vibration of bearing units of electric vehicle asynchronous traction motors. *Journal of Vibration and Control*, 27(9–10), 1123–1131. <https://doi.org/10.1177/1077546320937634>
6. Arhun, S., Hnatov, A., Migal, V., & Ponikarovska, S. (2020). Determining the quality of electric motors by vibro-diagnostic characteristics. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 7(29(e6)), 1–8. <https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.164101>
7. Bogajevskiy, A., Arhun, S., Hnatov, A., Dvadenko, V., Kunicina, N., & Patlins, A. (2019). *Selection of Methods for Modernizing the Regulator of the Rotation Frequency of Locomotive Diesels*. 1–6.
8. Bogajevskiy, A., Arhun, S., Dvadenko, V., & Ponikarovska, S. (2020). Determining the degree of increasing locomotive diesel economic efficiency by modernization of the speed controller. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 7(28).
9. Babeł, M., & Szkoda, M. (2016). Diesel locomotive efficiency and reliability improvement as a result of power unit load control system modernisation. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 18(1), 38–49. <https://doi.org/10.17531/ein.2016.1.6>
10. BABEł, M., & Szkoda, M. (2016). Diesel locomotive efficiency and reliability improvement as a result of power unit load control system modernisation. *Eksploatacja i Niezawodność*, 18.
11. Giannelli, R. A., Nam, E. K., Helmer, K., Younglove, T., Scora, G., & Barth, M. (2005). *Heavy-duty diesel vehicle fuel consumption modeling based on road load and power train parameters*. SAE Technical Paper.
12. Tomoda, T., Ogawa, T., Ohki, H., Kogo, T., Nakatani, K., & Hashimoto, E. (2010). Improvement of diesel engine performance by variable valve

- train system. *International Journal of Engine Research*, 11(5), 331–344.
13. Khomich, A. Z. (1987). *Fuel efficiency and auxiliary modes of diesel locomotives [Toplivnaya effektivnost i vspomogatelnie rezhimi teplovoznih dizelei]*. Transport.
 14. Volodin, A. I. (1979). *Fuel efficiency of diesel locomotive power plants [Toplivnaya ekonomichnost silovih ustanovok teplovozo]*. Transport.
 15. Sinclair, A. (2012). *Locomotive Engine Running and Management*. BoD–Books on Demand.
 16. Kaluza, A., & Kucharski, R. (2018). Locomotive diesel engine idle time distributions: Case studies from Poland, 2009–2013. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 524–535.
 17. Falendysh, A., Volodarets, M., Kletska, O., & Hatchenko, V. (2017). The impact of the type of operation on the parameters of a shunting diesel locomotive with hybrid power plant. *MATEC Web of Conferences*, 133, 03003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713303003>
 18. *Modeling of transients of diesel locomotive in the operational cycle in order to establish ways to reduce fuel consumption [Modeliuvannia perekhidnykh protsesiv teplovoznogo dyzelia v ekspluatatsiinomu tsykli z metoiu vstanovlennia shliakhiv znyzhennia vytrat palyva]* (No. 0199U003102; 96). (2001). KHarDAZT.
 19. Bogajevskiy, A. (2008). Computer model of a powerful transport diesel generator with an electronic control system [Computer model of a powerful transport diesel generator with an electronic control system]. *Открытые Информационные и Компьютерные Интегральные Технологии*. Харьков: Нац. Аэрокосм. Ун-т “ХАИ,” 38, 150–169.

Богаявський Олександр Борисович¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +380958153303, bogaevski.a@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6568-0340

Аргун Щасяна Валіковна¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0993780451, shasyana@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6098-8661

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Methodology for assessing the operational efficiency of transport diesel generators

Abstract. Problem. Today, there is a problem associated with the need to increase the efficiency of railway transport. Recently developed methods for determining the parameters of energy-saving operational work in stable and transient modes, as well as sets of corresponding technical means from various manufacturers allow us to speak of an integrated energy-saving technology. This development relies on the use of electronic controls. It is very effective both when used on new locomotive diesel generators

and when retrofitted during a major overhaul. The integrated indicators existing in railway transport were developed without taking into account the capabilities of modern control systems in the formation of both stable and transient modes. Therefore, it is difficult to obtain estimates on their basis that make it possible to compare the efficiency of energy saving of control systems of various manufacturers and the actual payback period under operating conditions. **Goal.** The purpose of this work is to develop a methodology for assessing the impact of technical controls on improving the operating efficiency of diesel-generators in a relative form, which allows, even at the stage of preparation for the introduction of energy-saving measures, such as modern frequency and power control systems for a diesel-generator, to determine the efficiency of diesel generators in steady state, transient and idling conditions expected during the operation of the vehicle. **Methodology.** The paper uses methods based on obtaining relative estimates based on well-known ratios for fuel consumption in stable and transient modes. **Results.** The simple expressions obtained in the work make it possible to evaluate in a relative form the degree of influence of electronic technical systems on improving the operational efficiency of mainline and shunting diesel locomotives without carrying out a time-consuming and material-resources experimental study. **Originality.** In the case of a mainline locomotive, the expected efficiency from the use of only frequency and power control systems (electronic regulator) is estimated, and in the case of a shunting locomotive, relative estimates allow us to estimate the expected efficiency from the simultaneous use of two control systems: a start-stop system and an electronic regulator. **Practical value.** The proposed method of relative estimates can be applied to analyze the potential increase in the operational efficiency of diesel generators of shunting diesel locomotives, the fleet of which is a significant consumer of diesel fuel in railway enterprises, mining and metallurgical industries in almost all countries.

Key words: diesel-generator unit; locomotive; diesel locomotive; speed controller; fuel economy.

Bogajevskiy Aleksandr¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +380958153303, bogaevski.a@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6568-0340>

Arhun Shchasiana¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +380993780451, shasyana@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.