

Захарчук О.П.<https://orcid.org/0000-0002-4359-5644>

Західноукраїнський національний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ЧИСЕЛ МЕХАНІЧНОЇ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ ПАСАЖИРСЬКОГО АВТОБУСА З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ПАЛИВНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ

У статті досліджено проблему підвищення паливної економічності пасажирських автобусів, що експлуатуються на міжміських та міжнародних маршрутах. У сучасних умовах значна частина автобусного парку автотранспортних підприємств України складається з транспортних засобів застарілих конструкцій, технічні параметри яких не повністю відповідають сучасним вимогам щодо енергоефективності та економічності експлуатації. Одним із ефективних способів підвищення паливної економічності таких транспортних засобів є оптимізація параметрів трансмісії, зокрема передавальних чисел механічної коробки передач (КПП).

Об'єктом дослідження є пасажирський автобус МАЗ-152062, оснащений дизельним двигуном ЯМЗ-7601 та восьмиступінчастою механічною КПП ЯМЗ-238М5. Встановлено, що наявна структура передавальних чисел не забезпечує ефективної роботи двигуна в зоні мінімальної питомої витрати палива під час руху з крейсерськими швидкостями на міжміських маршрутах, що призводить до підвищених витрат пального та зниження загальної енергоефективності транспортного засобу.

У роботі запропоновано модернізацію КПП шляхом заміни окремих пар шестерень і зміни передавальних чисел. На основі технічних характеристик автобуса проведено розрахунок тягово-швидкісних параметрів транспортного засобу, а також визначено силовий баланс і динамічний фактор для базового та модернізованого варіантів трансмісії, побудовано паливно-економічні характеристики та визначено розрахункові витрати палива залежно від швидкості руху транспортного засобу та режимів роботи двигуна. Результати досліджень показали, що оптимізація передавальних чисел трансмісії дозволяє знизити частоту обертання двигуна на сталих швидкостях руху та покращити умови його роботи у зоні найбільшої паливної ефективності. Розрахунки та експериментальні випробування підтвердили зменшення середньої витрати палива на міжміських маршрутах на 15–20 %. Отримані результати свідчать про доцільність модернізації трансмісії автобусів, що вже перебувають в експлуатації, без необхідності повної заміни силового агрегату або транспортного засобу в цілому.

Ключові слова: пасажирський автобус, механічна коробка передач, передавальні числа, трансмісія, паливна економічність, тягово-швидкісні характеристики, силовий баланс, енергоефективність.

Постановка проблеми. Сучасні умови експлуатації автобусів, задіяних у міжміських та міжнародних перевезеннях, суттєво відрізняються від тих, котрі працюють в умовах руху містом. Насамперед це велика протяжність рейсу, рух переважно з постійною швидкістю автомагістралями, переважно з повним навантаженням та зростаючими вимогами до паливної економічності й екологічної безпеки. Водночас значна частина автобусного парку автотранспортних підприємств України є фізично та морально застарілою, що ускладнює досягнення сучасних показників ефективності без суттєвих капіталовкладень у повну заміну рухомого складу. Об'єктом дослідження є пасажирський автобус МАЗ-152062, який експлуатується автотранспорт-

ним підприємством ПП "Терновояж" у міжміських перевезеннях. Це модель старого пострадянського зразка, комплектована потужним дизельним двигуном ЯМЗ-7601, котрий забезпечує дуже високий крутний момент і ресурс при роботі під великим навантаженням, отже призначений для важкої техніки, таким чином має високу витрату палива. Даний транспортний засіб оснащений механічною восьмиступеневою коробкою перемикачів швидкостей ЯМЗ-238М5, виконаної за схемою 4-ступенева КПП та демультиплікатор. Дана модель розрахована на передачу високого крутного моменту. Передавальні числа знаходяться в межах 1..9,48, підвищувальна передача відсутня, що спричиняє роботу двигуна на підвищених обертах при здійсненні транспортним



засобом міжміських перевезень. Це є додатковим фактором, котрий негативно впливає на паливну економічність пасажирського автобуса. Трансмісія, якою комплектуваний транспортний засіб, не забезпечує підтримку роботи двигуна в зоні оптимальних обертів у широкому діапазоні швидкостей. Це спричиняє підвищення паливних витрат, зростання теплових і механічних навантажень та зниження загальної енергоефективності транспортного засобу. При здійсненні міжміського рейсу середня витрата палива знаходиться в межах 32–40 л/100 км, що є доволі високим показником для автобуса такого пасажирого місткості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання підвищення паливної економічності та покращення тягово-швидкісних властивостей пасажирських автобусів залежить безпосередньо від обґрунтованого вибору структури трансмісії та оптимального підбору передавальних чисел її складових елементів. Особливої ваги це набуває для автобусів, що виконують міжміські та міжнародні рейси з великим місячним пробігом і тривалими режимами руху на сталих швидкостях. За таких умов навіть незначне відхилення режиму роботи двигуна від діапазону мінімальної питомої витрати палива спричиняє помітне зростання загальних витрат пального. Підвищення паливно-економічних властивостей транспортних засобів належить до ключових напрямів розвитку сучасної автомобільної галузі. Це зумовлено підвищенням цін на паливно-енергетичні ресурси, посиленням екологічних вимог до рухомого складу та необхідністю зниження експлуатаційних витрат автотранспортних підприємств. Найбільшої актуальності ця проблема набуває для пасажирських автобусів міжміського та міжнародного сполучення, оскільки вони експлуатуються за умов значних пробігів і тривалого руху зі сталою швидкістю.

У фундаментальних працях з теорії автомобіля та двигунів внутрішнього згоряння доведено, що рівень паливної економічності транспортного засобу суттєво залежить від режимів функціонування двигуна та раціональності використання його потужності [1, 2]. Зокрема, Дж. Б. Хейвуд зазначає, що мінімальна питома витрата палива дизельних двигунів досягається лише у обмеженому інтервалі частот обертання та навантажень, що потребує відповідного узгодження параметрів трансмісії з характеристиками двигуна [2].

Значна кількість сучасних наукових праць присвячена оптимізації роботи трансмісії, зокрема на обґрунтованому доборі передавальних чисел коробки передач і головної передачі. У роботах Л. Гуццалла та А. Скіарретта показано, що невідповідність передавальних чисел фактичним умо-

вам експлуатації спричиняють зростання витрати палива на 10–20 % у порівнянні з оптимальними режимами [1]. Автори наголошують, що для важких транспортних засобів, у тому числі автобусів, ефективним рішенням є застосування багатоступеневих трансмісій або раціонально оптимізованих механічних коробок передач.

У сучасних зарубіжних публікаціях значна увага приділяється Predictive Cruise Control (PCC) – системам прогнозного керування рухом, які враховують профіль дороги та умови руху. Новітні дослідження вдосконалюють цей підхід шляхом кооптимізації моменту двигуна та перемикання передач, що забезпечує додаткове зростання енергоефективності транспортного засобу [3].

Трансмісія є важливим елементом у забезпеченні паливної економічності транспортного засобу, так як визначає режими роботи двигуна за різних умов руху. Правильно підібрані передавальні числа трансмісії дають можливість понизити оберти двигуна в умовах швидкісної траси і зменшити втрати енергії та забезпечити мінімальну питому витрату пального [4, 5].

Постановка завдання. Отже актуальним питанням є пошук технічно обґрунтованих і економічно доцільних рішень щодо модернізації механічних коробок передач, які й надалі залишаються найпоширенішими на автотранспортних підприємствах. У зв'язку з цим, постає завдання оптимізації структури трансмісії пасажирських автобусів без заміни основних агрегатів, шляхом формалізованого та обґрунтованого добору передавальних чисел коробки передач. Розв'язання зазначеного завдання дасть можливість знизити витрати палива, покращити динамічні характеристики автобуса, підвищити ресурс силових агрегатів і забезпечити економічну ефективність експлуатації автобусів на міжнародних маршрутах. З метою зниження собівартості перевезень в умовах постійного зростання цін на паливо, автором поставлено завдання адаптувати коробку перемикання швидкостей до умов, у яких експлуатується досліджуваний транспортний засіб, а саме підвищити передавальні числа.

Виклад основного матеріалу. Власна маса транспортного засобу становить 12 800 кг, при цьому на задню вісь (візок) припадає 7 200 кг. Повна маса автомобіля дорівнює 18 000 кг, з яких на ведучу вісь припадає 11 500 кг. Такий розподіл маси має важливе значення під час визначення сили зчеплення ведучих коліс із дорожнім покриттям та при розрахунку тягових можливостей транспортного засобу.

Максимальна потужність двигуна становить 220 кВт, а максимальний крутний момент – 1300 Н·м. Максимальний крутний момент досягається

при частоті обертання колінчастого вала 1200 об/хв, тоді як максимальна потужність двигуна розвивається при 2100 об/хв. Ці параметри характеризують тягові можливості силового агрегату та визначають ефективність роботи двигуна в різних режимах експлуатації.

Трансмісія транспортного засобу обладнана восьмиступінчастою механічною коробкою передач, передаточні числа якої становлять: для першої передачі – 9,48, другої – 6,58, третьої – 4,68, четвертої – 3,48, п'ятої – 2,48, шостої – 1,81, сьомої – 1,35, восьмої – 1,00. Крім того, у трансмісії використовується додаткова коробка передач із передаточним числом 3,67 на вищій передачі та головна передача з передаточним числом 4,44. Сукупність цих передаточних чисел визначає зміну крутного моменту та швидкості руху автомобіля на різних передачах.

Для підвищення передавального числа трансмісії проведено заміну трьох пар шестерень, як зображено на рис. 1.

Передавальне число уніфікованої КПП розраховуємо як відношення числа зубців веденої шестерні ($Z_{ведена}$) до ведучої ($Z_{ведуча}$).

$$u_{ki} = \frac{Z_{ведена}}{Z_{ведуча}}, \quad (1)$$

Отримано значення передаточного числа трансмісії для кожної передачі із відомої залежності [6]:

$$U_j = u_{ki} \cdot u_0, \quad (2)$$

Дані розрахунків зведемо в табл. 2.

Виконано дослідження силових та динамічних показників транспортного засобу у робочому діапазоні частот обертання двигуна. Розраховано поточне значення потужності двигуна, у відповідності до частоти обертання колінчастого вала двигуна (n , об/хв).

$$N_e = N_{emax} \left[A_1 \cdot \frac{n}{n_N} + A_2 \cdot \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 - A_3 \cdot \left(\frac{n}{n_N} \right)^3 \right] \quad (3)$$

$$M_e = 9550 \frac{N_e}{n}, H \cdot m. \quad (4)$$

де N_e – ефективна потужність двигуна при частоті обертання n , кВт;

N_{emax} – максимальна ефективна потужність двигуна, кВт;

Таблиця 2

Передавальні відношення трансмісії транспортного засобу

Передача	I	I	II	IV	V	VI	VII	VIII
u_{ki} , після уніфікації	6,24	5,32	3,67	2,94	1,7	1,45	1	0,8
U_j , стандартна	73,79	53,84	39,05	31,02	20,07	14,68	10,65	8,45
U_j , модернізована	65,88	48,07	34,87	27,70	17,92	13,11	9,51	7,55

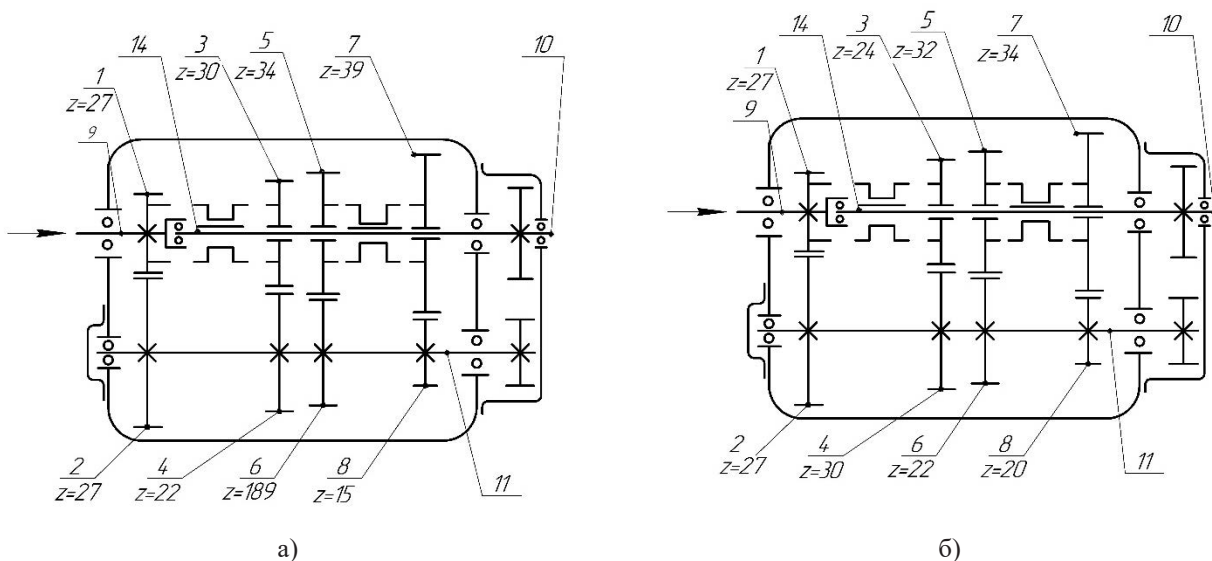


Рис. 1. Кінематична схема стандартної коробки передач ЯМЗ-238М5

а) до заміни шестерень; б) після заміни шестерень 1,2 – шестерні четвертої та восьмої передачі; 3,4 – шестерні третьої та сьомої передачі; 5,6 – шестерні другої та шостої передачі; 7, 8 – шестерні першої та п'ятої передачі; 9 – первинний вал; 10 – вторинний вал; 11 – проміжний вал

n – поточна частота обертання колінчастого вала двигуна, об/хв;

n_N – номінальна частота обертання колінчастого вала двигуна, об/хв;

A_1, A_2, A_3 – емпіричні коефіцієнти, що характеризують форму зовнішньої швидкісної характеристики двигуна.

Для дизельних двигунів значення емпіричних коефіцієнтів становлять $A_1 = 0,5, A_2 = 1,5, A_3 = 1$.

Розрахуємо тягове зусилля на ведучих колесах:

$$P_{ki} = \frac{M_e \cdot u_{ki} \cdot u_0 \cdot \eta}{r_c} \quad (5)$$

Для того, щоб розрахувати динамічну характеристику автобуса для кожної i -ї передачі розрахуємо швидкість V , км/год із залежності:

$$V_i = 0,377 \cdot \frac{n \cdot r}{u_{ki} \cdot u_0} \quad (6)$$

Розрахуємо силу опору повітря P_w , Н:

$$P_w = \frac{k \cdot F \cdot V^2}{3,6^2} \quad (7)$$

де F – лобова площа автомобіля, м²;

V – швидкість автомобіля, км/год;

k – коефіцієнт опору повітрю

Щоб оцінити здатність автомобіля розганятися, підтримувати рух із заданою швидкістю та долати підйоми дороги розраховано його динамічний фактор:

$$D = \frac{P_k - P_w}{m_a \cdot g} \quad (7)$$

Результати розрахунку для транспортного засобу у базовій комплектації внесли до табл. 3, а модернізованого до табл. 4.

Таблиця 3

Силовий баланс автобуса в базовій комплектації

Параметри		Значення параметрів						
		600	800	1000	1200	1400	1600	1800
n, об/хв		600	800	1000	1200	1400	1600	1800
N _e , кВт		50,01	71,45	94,44	116,71	136,99	153,84	165,90
M _e , Н·м		782,71	853,38	902,30	929,47	934,91	918,60	880,55
1 передача	V, км/год	3,505	4,673	5,842	7,01	8,178	9,347	10,515
	P _{кв} , Н	102100	111300	117700	121200	121900	119800	114800
	P _w , Н	3,907	6,945	10,852	15,627	21,27	27,781	35,16
	D	0,579	0,631	0,667	0,687	0,691	0,679	0,651
2 передача	V, км/год	4,691	6,254	7,818	9,381	10,945	12,508	14,072
	P _{кв} , Н	76280	83170	87940	90590	91120	89530	85820
	P _w , Н	6,996	12,438	19,434	27,986	38,091	49,752	62,967
	D	0,432	0,471	0,498	0,513	0,516	0,507	0,486
3 передача	V, км/год	6,63	8,839	11,049	13,259	15,469	17,679	19,889
	P _{кв} , Н	53970	58840	62220	64090	64470	63340	60720
	P _w , Н	13,977	24,847	38,824	55,907	76,095	99,389	125,79
	D	0,306	0,333	0,352	0,363	0,365	0,359	0,343
4 передача	V, км/год	8,345	11,126	13,908	16,689	19,471	22,253	25,034
	P _{кв} , Н	42880	46750	49430	50920	51220	50320	48240
	P _w , Н	22,144	39,367	61,51	88,575	120,56	157,467	199,294
	D	0,243	0,265	0,28	0,288	0,29	0,284	0,272
5 передача	V, км/год	12,061	16,082	20,102	24,123	28,143	32,164	36,184
	P _{кв} , Н	29670	32340	34200	35230	35430	34820	33370
	P _w , Н	46,261	82,242	128,503	185,045	251,866	328,968	416,351
	D	0,168	0,183	0,193	0,199	0,199	0,196	0,187
6 передача	V, км/год	16,127	21,503	26,878	32,254	37,629	43,005	48,381
	P _{кв} , Н	22190	24190	25580	26350	26500	26040	24960
	P _w , Н	82,704	147,03	229,734	330,818	450,279	588,12	744,339
	D	0,125	0,136	0,144	0,147	0,148	0,144	0,137
7 передача	V, км/год	22,782	30,376	37,97	45,563	53,157	60,751	68,345
	P _{кв} , Н	15710	17120	18110	18650	18760	18430	17670
	P _w , Н	165,04	293,41	458,45	660,17	898,57	1174	1485
	D	0,088	0,095	0,1	0,102	0,101	0,098	0,092
8 передача	V, км/год	28,707	38,276	47,845	57,414	66,983	76,552	86,121
	P _{кв} , Н	12460	13590	14370	14800	14890	14630	14020
	P _w , Н	262,06	465,8	727,95	1048	1427	1864	2359
	D	0,069	0,074	0,077	0,078	0,076	0,072	0,066

Силовий баланс модернізованого автобуса

Параметри		Значення параметрів						
n, об/хв		600	800	1000	1200	1400	1600	1800
$N_{\text{с}}$, кВт		50,01	71,45	94,44	116,71	136,99	153,84	165,90
$M_{\text{с}}$, Н·м		782,71	853,38	902,30	929,47	934,91	918,60	880,55
1 передача	V , км/год	4,416	5,888	7,361	8,833	10,305	11,777	13,249
	$P_{\text{к}}$, Н	81020	88340	93400	96210	96770	95090	91150
	P_{w} , Н	6,202	11,026	17,229	24,809	33,768	44,105	55,821
	D	0,459	0,501	0,529	0,545	0,548	0,539	0,516
2 передача	V , км/год	6,379	8,505	10,632	12,758	14,884	17,011	19,137
	$P_{\text{к}}$, Н	56094	61169	64663	66615	67279	65836	63174
	P_{w} , Н	12,94	23,005	35,945	51,761	70,452	92,019	116,462
	D	0,318	0,347	0,366	0,377	0,379	0,373	0,357
3 передача	V , км/год	8,345	11,126	13,908	16,689	19,471	22,253	25,034
	$P_{\text{к}}$, Н	42884	46751	49431	50928	51224	50323	48245
	P_{w} , Н	22,144	39,367	61,51	88,575	120,56	157,467	199,294
	D	0,243	0,265	0,28	0,288	0,29	0,284	0,272
4 передача	V , км/год	10,179	13,572	16,965	20,359	23,752	27,145	30,538
	$P_{\text{к}}$, Н	35158	38322	40522	41743	41997	41251	39556
	P_{w} , Н	32,951	58,579	91,529	131,802	179,398	234,315	296,555
	D	0,199	0,217	0,229	0,236	0,237	0,233	0,222
5 передача	V , км/год	15,433	20,577	25,722	30,866	36,01	41,155	46,299
	$P_{\text{к}}$, Н	23190	25285	26733	27530	27693	27214	26085
	P_{w} , Н	75,74	134,649	210,39	302,961	412,364	538,598	681,663
	D	0,131	0,143	0,15	0,154	0,155	0,151	0,144
6 передача	V , км/год	21,913	29,217	36,522	43,826	51,13	58,435	65,739
	$P_{\text{к}}$, Н	16333	17848	18825	19392	19548	19167	18377
	P_{w} , Н	152,66	271,4	424,15	610,78	831,34	1086	1374
	D	0,092	0,099	0,104	0,106	0,106	0,102	0,096
7 передача	V , км/год	28,707	38,276	47,845	57,414	66,983	76,552	86,121
	$P_{\text{к}}$, Н	12466	13592	14377	14837	14896	14635	14022
	P_{w} , Н	262,06	465,89	727,95	1048	1427	1864	2359
	D	0,069	0,074	0,077	0,078	0,076	0,072	0,066
8 передача	V , км/год	35,007	46,676	58,345	70,014	81,682	93,351	105,02
	$P_{\text{к}}$, Н	10222	11146	11785	12142	12218	12747	11553
	P_{w} , Н	389,7	692,8	1083	1559	2122	2771	3507
	D	0,056	0,059	0,061	0,06	0,057	0,052	0,045

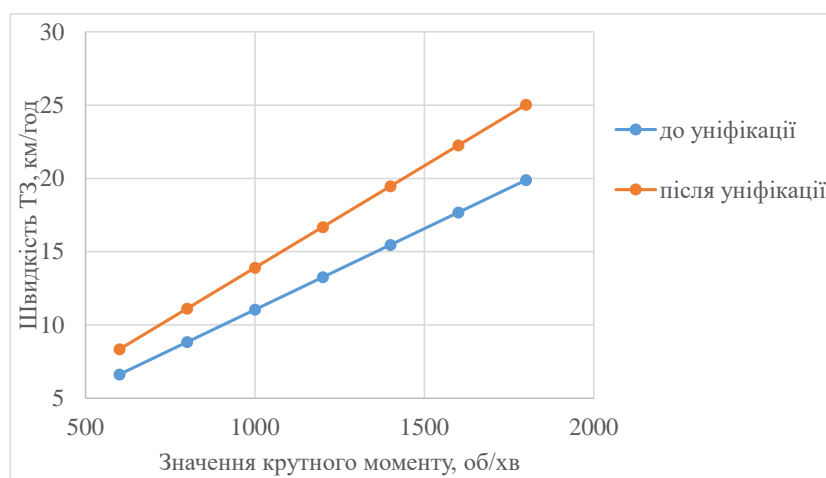


Рис. 2. Залежність швидкості транспортного засобу від частоти обертання колінчастого вала двигуна на третій передачі

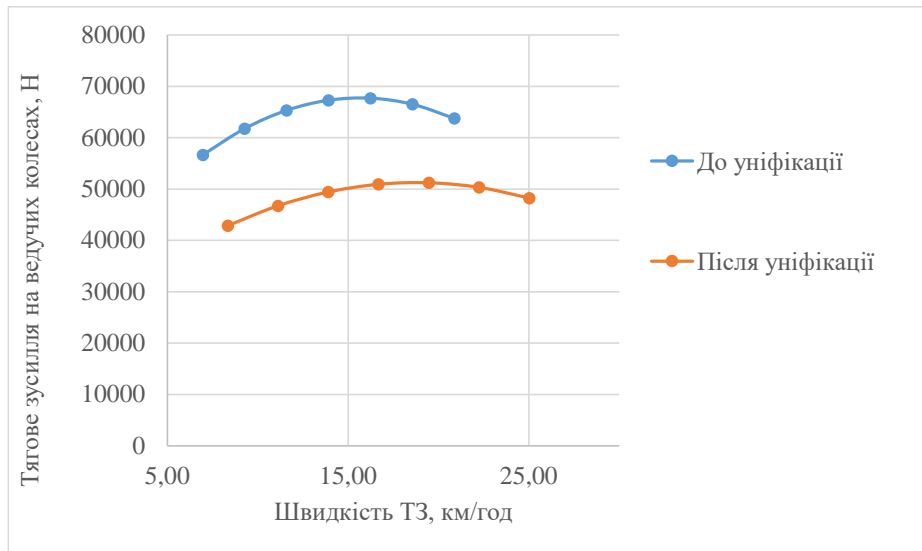


Рис. 3. Тягова характеристика транспортного засобу до та після уніфікації трансмісії на третій передачі

Для прогнозування витрати палива проведемо розрахунок паливно-економічної характеристики пасажирського автобуса для базового варіанта та після уніфікації. Питома витрата палива визначається за відповідною залежністю:

$$g_e(n_i) = g_N \cdot k_n(n_i), \quad (9)$$

де g_N – питома витрата палива при номінальному режимі роботи двигуна, г/(кВт год) для дизельного двигуна $g_N = 240$ г/(кВт год);

$g_e(n_i)$ – питома ефективна витрата палива при частоті обертання n_i , г/(кВт·год);

$k_n(n_i)$ – коефіцієнт, що враховує зміну питомої витрати палива залежно від частоти обертання двигуна.

$$k_n(n_i) = 1.25 - 0.99 \cdot \left(\frac{n_i}{n_N}\right)^2 - 0.24 \cdot \left(\frac{n_i}{n_N}\right)^3 \quad (10)$$

Паливну економічність транспортного засобу для кожної передачі (9) було визначено на основі його паливно-швидкісної характеристики. Для

того, щоб виконати побудову цієї характеристики застосовують відповідну залежність:

$$Q(n_i, U_j) = \frac{g_n \cdot (k_n(n_i)) \cdot k_N(n_i, U_j)}{3.610 \cdot \eta_{mp} \cdot \rho_n \cdot 1000} \cdot (F_\psi \cdot F_\omega(n_i, U_j)) \quad (11)$$

ρ_n – густина пального, кг/л;

Для подальших розрахунків визначено силу опору дороги руху автомобіля, Н:

$$P_\psi = \psi \cdot G \quad (12)$$

де $G = g \cdot G_a$ – повна вага автомобіля, Н;

$g = 9,8$ м/с² – прискорення вільного падіння;

m – маса автомобіля;

При цьому залежність, яка використовується для визначення коефіцієнта $k_N(n_i, U_j)$, який характеризує ступінь використання потужності двигуна під час руху транспортного засобу має наступний вигляд:

$$k_N(n_i, U_j) = 3.27 - 8.22 \cdot \frac{F_\psi + F_\omega(n_i, U_j)}{F_i(n_i, U_j)} + 9.13 \cdot \left(\frac{F_\psi + F_\omega(n_i, U_j)}{F_i(n_i, U_j)}\right)^2 - 3.18 \cdot \left(\frac{F_\psi + F_\omega(n_i, U_j)}{F_i(n_i, U_j)}\right)^3 \quad (13)$$

Отримані значення занесемо у таблицю.

Таблиця 5

Розрахункові витрати пального до уніфікації

Параметри	Значення параметрів						
	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
n , об/хв	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
M_{ψ} , Н·м	50,01	71,45	94,44	116,71	136,99	153,84	165,9
Q_1 , л/100км	40,3	39,8	39,8	40,1	40,8	41,6	42,2
Q_2 , л/100км	39,6	39,1	39,0	39,3	40,0	40,9	41,4
Q_3 , л/100км	38,8	38,3	38,2	38,5	39,2	40,0	40,9
Q_4 , л/100км	38,0	37,5	37,4	37,7	38,4	39,2	39,7
Q_5 , л/100км	37,1	36,7	36,6	36,9	37,5	38,4	38,8
Q_6 , л/100км	35,9	35,5	35,4	35,7	36,3	37,1	37,6
Q_7 , л/100км	34,9	34,5	34,4	34,7	35,3	36,1	36,6
Q_8 , л/100км	34,1	33,8	33,7	34,0	34,6	35,3	35,8

Розрахункові витрати пального після уніфікації

Параметри	Значення параметрів						
	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
n , об/хв	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
M_e , Н·м	50,01	71,45	94,44	116,71	136,99	153,84	165,9
Q_1 , л/100км	32,27	31,86	31,81	32,08	32,60	33,32	33,74
Q_2 , л/100км	31,66	31,25	31,21	31,47	31,98	32,68	33,10
Q_3 , л/100км	31,01	30,62	30,57	30,83	31,33	32,02	32,74
Q_4 , л/100км	30,36	29,98	29,93	30,19	30,68	31,35	31,75
Q_5 , л/100км	29,72	29,34	29,30	29,54	30,03	30,69	31,07
Q_6 , л/100км	28,75	28,39	28,34	28,58	29,05	29,69	30,06
Q_7 , л/100км	27,92	27,60	27,52	27,76	28,24	28,88	29,28
Q_8 , л/100км	27,28	27,04	26,96	27,20	27,68	28,24	28,64

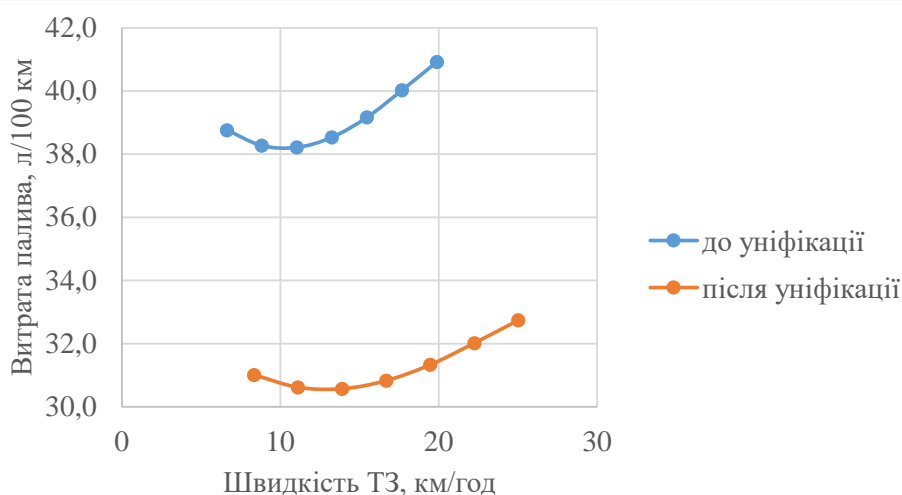


Рис. 4. Розрахункова витрата палива транспортного засобу до та після уніфікації трансмісії на третій передачі

На практиці дана уніфікація проведена на базі автотранспортного підприємства ПП "Терновояж", а розхід палива перевірений на кількох маршрутах. На маршруті Львів – Щецин середня витрата палива становила 33,2 л/100 км до заміни шестерень КПП, та 26,4 після заміни, на маршруті Запоріжжя – Слупськ 35,1 л/100 км та 27,7 л/100 км відповідно, на туристичному маршруті Тернопіль – Яремче 38,5 л/100 км та 35,5 відповідно.

Висновки. У результаті виконаного дослідження проаналізовано вплив передавальних чисел механічної коробки передач на тягово-швидкісні та паливно-економічні показники пасажирського автобуса МАЗ-152062. Встановлено, що наявна структура трансмісії не забезпечує ефективної роботи двигуна у зоні мінімальної питомої витрати палива під час руху з крейсерськими швидкостями на міжміських маршрутах, що призводить до підвищених обертів двигуна та збільшення витрат пального.

Запропоновано модернізацію трансмісії шляхом зміни передавальних чисел механічної коробки передач через заміну окремих пар шестерень. На основі технічних характеристик транспортного засобу виконано розрахунок передавальних відношень трансмісії, силового балансу, швидкісних характеристик та динамічного фактору автобуса до і після модернізації. Проведені розрахунки показали, що оптимізація передавальних чисел дозволяє знизити частоту обертання колінчастого валу двигуна під час руху на вищих передачах, що сприяє покращенню умов його роботи та підвищенню енергоефективності транспортного засобу.

Розрахунок паливно-економічних характеристик показав суттєве зменшення витрати палива після уніфікації трансмісії. Зокрема, розрахункові значення витрати палива зменшилися з приблизно 34-40 л/100 км до 27-32 л/100 км залежно від режиму руху. Практичні випробування на реальних маршрутах також підтвердили ефективність

запропонованої модернізації: середня витрата палива зменшилась приблизно на 15-20 %.

Таким чином, оптимізація передавальних чисел механічної коробки передач є ефективним і технічно доцільним способом підвищення паливної економічності автобусів, що експлуатуються на міжміських маршрутах. Запропоноване рішення не потребує повної заміни силового

агрегату або транспортного засобу, що робить його економічно вигідним для автотранспортних підприємств і дозволяє знизити експлуатаційні витрати при збереженні необхідних тягових властивостей транспортного засобу. Разом з тим доцільно дослідити залишковий ресурс вузлів досліджуваного транспортного засобу, які підлягають такій уніфікації.

Список літератури:

1. Guzzella L., Sciarretta A. *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*. 2nd ed. Berlin : Springer. 2013. 422 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35913-2>
2. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Education. 2018. 1072 p. <https://doi.org/10.1036/9781260116116>
3. Chu H., Na X., Liu H., Wang Y., Yang Z., Zhang L. Real-Time Co-optimization of Gear Shifting and Engine Torque for Predictive Cruise Control of Heavy-Duty Trucks. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 37. Article 42. <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01015-7>
4. Milićević S. V., Blagojević I. A. Optimization of gear ratios and gear-shifting strategy for enhanced efficiency in tracked vehicles. *Military Technical Courier*. 2023. Vol. 71, No. 4. Pp. 1028–1045. https://www.academia.edu/122577446/Optimization_of_gear_ratios_and_gear_shifting_strategy_for_enhanced_efficiency_in_tracked_vehicles
5. Пельо Р. М. Оптимізація параметрів трансмісії транспортних засобів : дис. канд. техн. наук : 05.22.02 / Р. М. Пельо. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2020. – 200 с. – URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1754/dysertaciyaapeloroman.pdf>
6. Тяговий розрахунок автомобіля. Методичні вказівки для курсового проекту з дисципліни «Автомобілі» для підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю 274 – «Автомобільний транспорт» / Укл.: Литвин О.О., Кужельний Я.В., Скляр В.М.–Чернігів: ЧНТУ, 2019. – 48с. <https://ir.stu.cn.ua/server/api/core/bitstreams/a696d1e5-05c7-4df5-bb1e-77e5a573f8ff/content>

Zakharchuk O.P. OPTIMIZATION OF GEAR RATIOS OF A PASSENGER BUS MANUAL TRANSMISSION TO IMPROVE FUEL ECONOMY

The article investigates the problem of increasing the fuel efficiency of passenger buses operated on intercity and international routes. In modern conditions, a significant part of the bus fleet of Ukrainian motor transport enterprises consists of vehicles of outdated designs, the technical parameters of which do not fully meet modern requirements for energy efficiency and operating economy. One of the effective ways to increase the fuel efficiency of such vehicles is to optimize the transmission parameters, in particular the gear ratios of the manual transmission (GPT).

The object of the study is the MAZ-152062 passenger bus, equipped with a YaMZ-7601 diesel engine and an eight-speed YaMZ-238M5 manual gearbox. It was found that the existing gear ratio structure does not ensure efficient engine operation in the zone of minimum specific fuel consumption when driving at cruising speeds on intercity routes, which leads to increased fuel consumption, increased thermal and mechanical loads on units and a decrease in the overall energy efficiency of the vehicle.

The paper proposes a gearbox modernization by replacing individual pairs of gears and changing the gear ratios. Based on the technical characteristics of the bus, the vehicle's traction and speed parameters were calculated, and the power balance and dynamic factor were determined for the basic and modernized transmission variants., fuel-economic characteristics were constructed, and the estimated fuel consumption was determined depending on the vehicle's speed and engine operating modes. The research results showed that optimizing the transmission gear ratios allows reducing the engine's rotation frequency at constant speeds and improving its operating conditions in the zone of greatest fuel efficiency. Calculations and experimental tests confirmed a 15–20% reduction in average fuel consumption on intercity routes. The results obtained indicate the feasibility of upgrading the transmission of buses already in operation without the need for a complete replacement of the power unit or the vehicle as a whole.

Keywords: *passenger bus, manual gearbox, gear ratios, transmission, fuel efficiency, traction-speed characteristics, power balance, energy efficiency.*

Дата першого надходження статті до видання: 17.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026