

ДО ПИТАННЯ ЩОДО СТВОРЕННЯ ПРИЧІПНОГО АВТОБУСНОГО ПОЇЗДА

ON THE QUESTION OF CREATING A TRAILER BUS TRAIN



Сахно Володимир Прохорович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри автомобілів. e-mail: svp_40@ukr.net, тел. +38 0676655344,

<https://orcid.org/0000-0002-5144-7131>



Диких Олександр Вікторович, магістр, Національний транспортний університет, аспірант кафедри автомобілів. e-mail: aleksandr.dik@ukr.net, тел. +38 0679466542

<https://orcid.org/0000-0002-3511-3350>

Анотація. Шарнірно-з'єднані автобуси і автобусні автопоїзди експлуатуються, як правило, у великих містах з напруженим транспортним потоком. Тому тягово-швидкісні властивості автобусних поїздів повинні бути на рівні одиночних автобусів. Серед 13 показників тягово-швидкісних властивостей, що оцінюють динаміку автопоїзда, найбільш важливими є максимальна швидкість, прискорення при розгоні, час та шлях розгону до максимальної швидкості, час розгону на шляху 400 і 1000 м. За цими показниками показана ефективність і перспективність використання причіпних пасажирських автопоїздів. У якості об'єкту дослідження обрані дизельний автобус А70132 і електробус А701 при їх роботі з причепом. Виконана порівняльна оцінка цих автобусів за показниками тягово-швидкісних властивостей. При цьому встановлено, що використання електробуса для створення автобусного поїзда є проблематичним з погляду на відсутність запасу тягової сили в зоні підвищених навантажень, обумовлених розгоном автобуса. Разом з тим, для автобуса з дизелем є значний запас тяги на нижчих передачах, обумовлений роботою гідротрансформатора. Доведена ефективність використання такого автобусного поїзда при роботі на міських маршрутах, на яких є обмеження максимальної швидкості руху на рівні 50 км/год. Якщо ж швидкість руху збільшується до 70 км/год, то використання автобусного поїзда у складі автобуса А70132 і причепа загальною масою 16000 кг стає малоефективним. Для збільшення швидкості необхідно або збільшення потужності двигуна автобуса, або активізація причепа.

Ключові слова: автобус, електробус, причіп, автобусний поїзд, тягово-швидкісні властивості, потужність, ефективність використання.

Вступ.

Сучасний розвиток громадського і вантажного транспорту веде до збільшення попиту транспортних засобів великих міст і міських автобусів. Ця тенденція обґрунтовує аргументи економії енергії та зниження рівня забруднення навколишнього середовища, обумовленою обмеженістю кількості транспортних засобів і водіїв, необхідних для перевезення великої кількості вантажів і людей. Як слідство, виробники вантажівок та міських автобусів у теперішній час проектуєть конструкції великої місткості у формі спільних та багатоланкових транспортних засобів [1]. Так, німецька компанія Göppel Bus. представила новий міський автобус з окремим пасажирським причепом [2].

Перевага таких автопоїздів – це можливість легко варіювати місткість автобуса в залежності від пасажиропотоку, мінливого протягом доби, можливість знизити економічні та екологічні витрати за рахунок застосування в години пік ПС з причепом, а в міжпіковий час того ж ПС без причепа. Тобто, автобуси з причепом можуть дати те, чого не можуть дати такі ж по місткості зчленовані автобуси. І автобусні причепа почали повертатися! При створенні таких автопоїздів необхідно вирішити ряд практичних завдань, пов'язаних, у першу чергу, з їх комплектацією [3]. Тому вибір автобуса і причепа для автобусного поїзда є актуальним на сьогодні.



Рисунок 1 – Автобус з причепом компанії Göppel Bus [2]

Figure 1 – Göppel Bus trailer bus [2]

Мета і методи. Шарнірно-з'єднані автобуси і автобусні автопоїзди експлуатуються, як правило, у великих містах з напруженим транспортним потоком. Тому тягово-швидкісні властивості автобусних поїздів повинні бути на рівні одиночних автобусів. Серед 13 показників тягово-швидкісних властивостей [4] це, в першу чергу, максимальна швидкість, прискорення при розгоні, час та шлях розгону до максимальної швидкості, час розгону на шляху 400 і 1000 м. Усі ці показники визначають або аналітичним (шляхом інтегруванням диференціального рівняння руху автомобіля), або графоаналітичним методом (шляхом тягового розрахунку автопоїзда) [5]. В основі аналітичного методу для визначення колової сили на ведучих колесах покладена залежність крутного моменту двигуна у функції частоти обертання у вигляді квадратного поліному, що не є характерним для більшості сучасних двигунів [6]. Тому означені показники тягово-швидкісних властивостей будемо визначати на основі тягового розрахунку автобусного поїзда [7].

Мета публікації полягає у визначенні показників тягово-швидкісних властивостей автобуса з дизелем А70132 і електробуса А70100 з можливістю створення на їх основі автобусного поїзда.

Об'єктом дослідження є показники тягово-швидкісних властивостей автобуса з дизелем А70132 і електробуса А70100 при їх роботі з причепом [7]. В роботі використано наступні **методи**: аналізу та узагальнення літературних джерел, математичне моделювання режимів руху автобусного поїзда, порівняльний аналіз показників тягово-швидкісних властивостей автобуса і електробуса.

Результати і пояснення. Визначення показників тягово-швидкісних властивостей автобусного поїзда здійснювалося на основі вихідних характеристик транспортних засобів заводу «Богдан», що виготовляє автобуси і електробуси, табл.1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики транспортних засобів заводу «Богдан» [8]

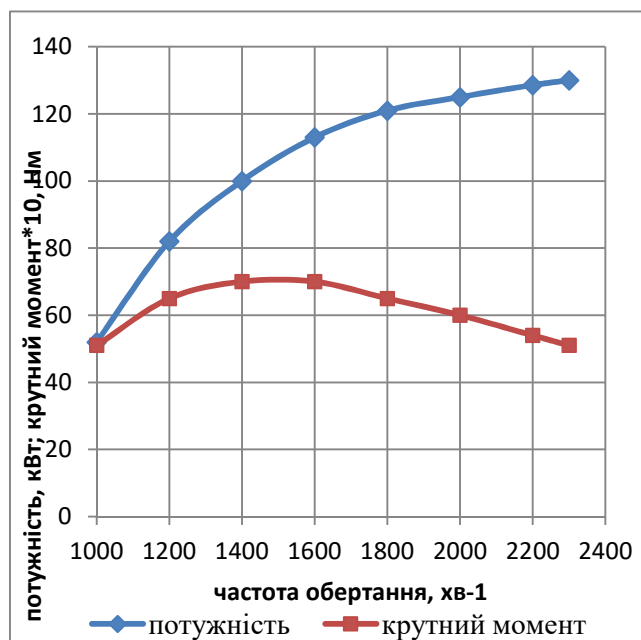
Table 1 – Technical characteristics of vehicles of the plant "Bogdan" [8]

Тип	Автобус	Електробус
1	2	3
Модель	A70132	A70100
Призначення	Міський, низькопідлоговий	Міський, низькопідлоговий
Довжина / ширина / висота, мм	11960/2550/3180	11960/2550/3180
Колісна база, мм	5860	
Колія, передня/задня, мм	2160/1890	
Споряджена маса, кг	10860	
Повна маса, кг	18250	

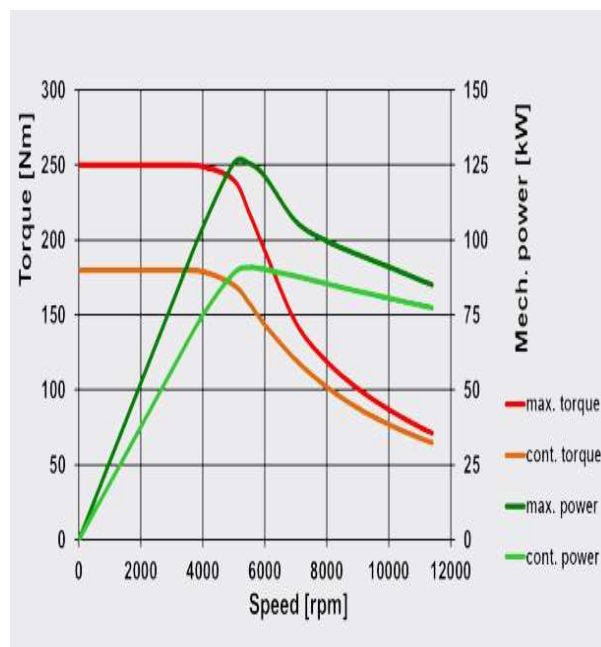
Продовження табл. 1
Continuation of table. 1

1	2	3
4Максимальна швидкість, км/год	70	70
Двигун / Тяговий електродвигун	IVECO NEF F4AE-6	4 блоки тягових батарей, запас ходу до 200 км
Розташування двигуна	Заднє повздовжнє	
Кількість та розташування циліндрів	6, рядне	
Об'єм, л	5,9	
Потужність, кВт (к.с.)	194 (264)/2400	2×125 кВт/11000
Крутний момент, Нм	1000/1400	2×250
Екологічний стандарт	Euro 5	
Коробка передач	Allison	
Тип	Автоматична	
Кількість передач переднього ходу	6	
Головна передача	5,76	
Пасажиromісткість (без водія) чол.	106	80
Кількість місць для сидіння (без водія)	30	26
Колеса / Шини	272/70R22.5	
Номинальна напруга, В		24

Тягово-швидкісні властивості автобуса оцінюють за допомогою його динамічної характеристики, графіка прискорень та швидкісної характеристики розганяння, які будують на основі швидкісної зовнішньої характеристики дизеля і електродвигуна [8], рис.2.



а)



б)

Рисунок 2 – Швидкісна зовнішня характеристика дизеля (а) і електродвигуна (б)

Figure 2 – High-speed external characteristics of diesel (a) and electric motor (b)

Для побудови динамічної характеристики автобуса визначаємо динамічний фактор D автобуса і прискорення автобуса J , що обчислюємо за формулами [9]

$$D = \frac{P_p - P_w}{G_a}, \quad (1)$$

$$j = \frac{D - \Psi}{\delta}, \quad (2)$$

де P_p – сила тяги на ведучих колесах, Н;

P_w – сила опору повітря, Н,

G_a – сила тяжіння від повної маси автомобіля, Н;

Ψ – коефіцієнт опору дороги, $\Psi = 0,02$;

δ – коефіцієнт, що враховує інерцію обертових мас автомобіля при розганянні, $\delta = 1 + \sigma_1 u_{ki}^2 + \sigma_2$,

$\sigma_1 = 0,04$; $\sigma_2 = 0,04$.

$$P_p = \frac{M_k U_k K_T U_0 \eta_{tp}}{r_d}, \quad \text{Н}, \quad (3)$$

де M_k – крутний момент двигуна за його швидкісною зовнішньою характеристикою, Н·м;

U_k, U_0 – передаточні числа відповідно коробки передач, додаткової коробки та головної передачі;

K_T – коефіцієнт трансформації, що приймається рівним одиниці при розрахунку прискорень автобуса (блокування гідротрансформатора у процесі розгону);

η_{tp} – коефіцієнт корисної дії (ККД) трансмісії автобуса;

r_d – динамічний радіус коліс автобуса, м.

$$P_w = W \cdot V^2, \quad \text{Н}, \quad (4)$$

де W – фактор обтічності автомобіля, Н·с²/м²;

V – швидкість автомобіля, м/с.

$$V = \frac{\omega \cdot r_k}{U_k U_{dk} U_0}, \quad \text{м/с}; \quad (5)$$

На рис.3 наведені графіки динамічної характеристики автобуса і електробуса. При цьому враховано, що автобус з дизелем обладнано автоматичною трансмісією з гідротрансформатором, який блокується на вищих передачах.

Аналіз наведених графіків показує, що використання електробуса для створення автобусного поїзда є проблематичним з погляду на відсутність запасу тягової сили в зоні підвищених навантажень обумовлених розгоном автобуса. Для автобуса з дизелем є значний запас тяги на нижчих передачах, обумовлений роботою гідротрансформатора. Разом з тим, тягові можливості автобуса на 6 передачі не дозволяють використовувати цю передачу при роботі автобуса у складі автобусного поїзда. Якщо зважити на обмеження максимальної швидкості автобуса на рівні 70 км/год, то ця швидкість досягається на 5 передачі, де ще є запас тяги для автобусного поїзда.

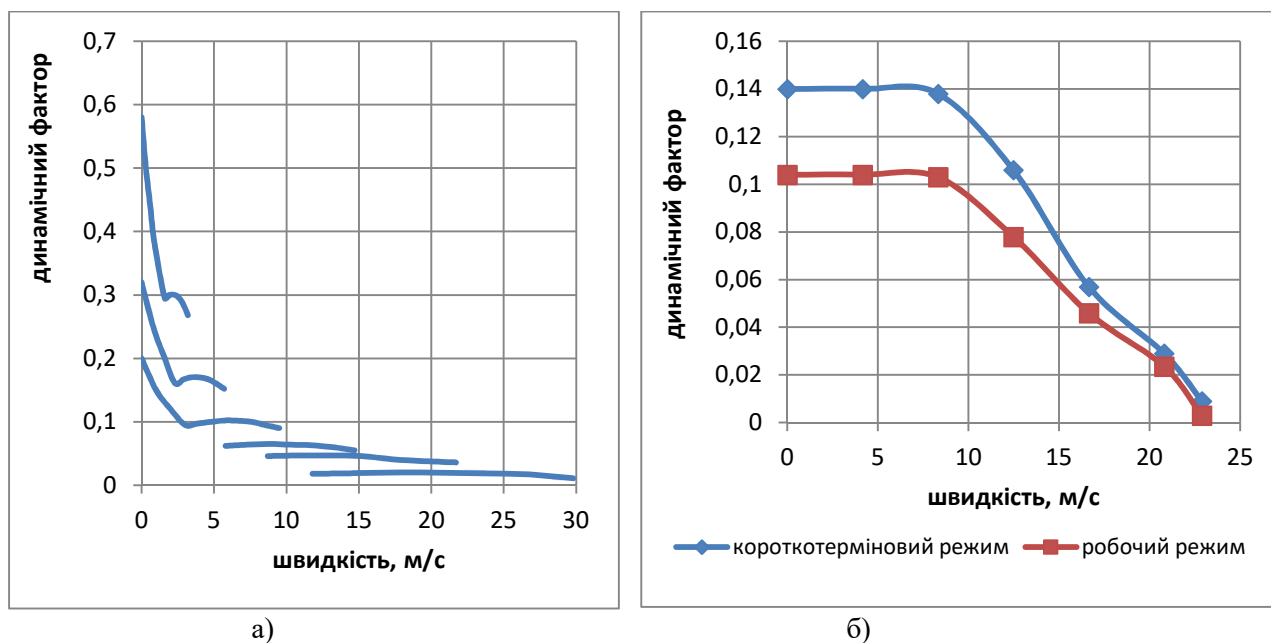


Рисунок 3 – Динамічна характеристика автобуса (а) і електробуса (б)
Figure 3 – Dynamic characteristics of the bus (a) and electric bus (б)

Значення динамічного фактору по передачах покладені в основу розрахунку графіка прискорень, рис.4.

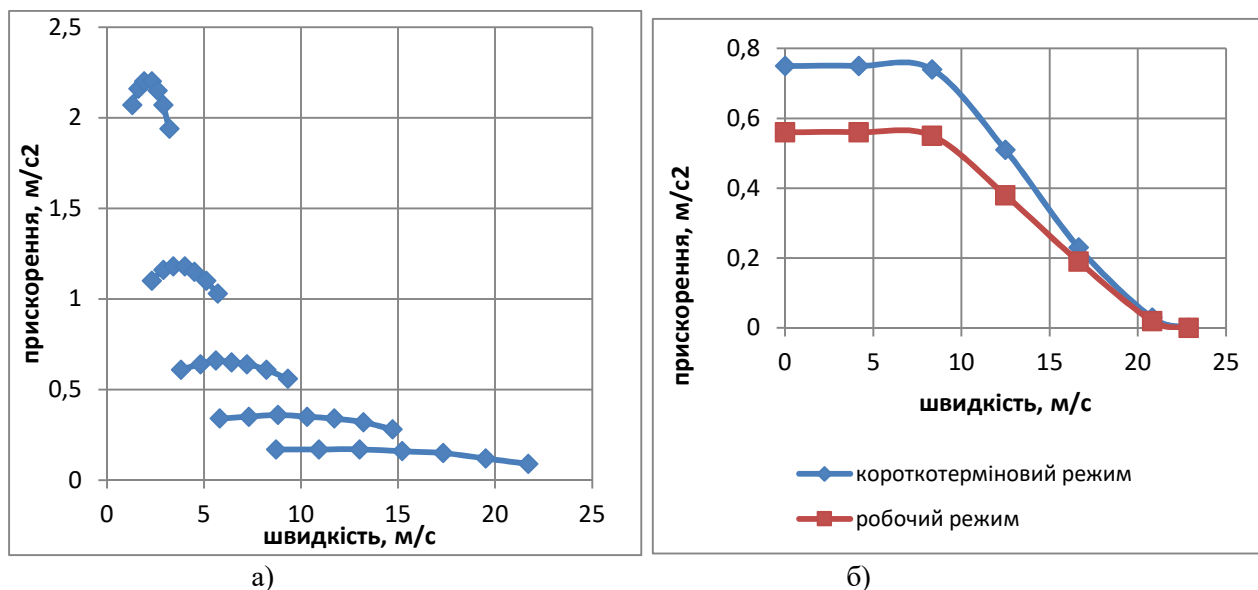


Рисунок 4 – Графік прискорень автобуса (а) і електробуса (б)
Figure 4 – Schedule of accelerations of the bus (a) and electric bus (б)

Аналіз даних, рис.4, підтверджує висновок про проблематичність використання електробуса при створенні автобусного поїзда. Тому у подальшому визначимо показники тягово-швидкісних властивостей автобусного поїзда з автобусом А70132. Прийmemo масу причепа $G_p=16000$ кг. Ці показники визначимо шляхом розв'язку диференціального рівняння руху автомобіля за виразами наведеними у табл. 2 [10].

Таблиця 2 – Основні розрахункові формули для визначення показників тягово-швидкісних властивостей автомобіля

Table 2 – Basic calculation formulas for determining the traction and speed properties of the car

Параметр	Розрахункова формула
1	2
Рівняння руху при розгоні	$\frac{dV}{dt} m_a \delta_o = aV^2 + bV + c_i$
Час розгону, с	$\tau = M_a \delta_o \int_{V_H}^{V_K} \frac{dV}{aV^2 + bV + c_i}$
Шлях розгону, м	$S = m_a \cdot \delta_o \cdot \left\{ \frac{1}{2a_i} \ln aV^2 + bV + c_i \right\}_{V_H}^{V_K} - \frac{b_i}{2 \cdot a_i} \int_{V_H}^{V_K} \frac{dV}{aV^2 + bV + c_i}$
Рівняння руху при вибігу	$\frac{dV}{dt} \cdot m_a \cdot \delta_o' = -m_a \cdot g(f_0 K_f V) - K_B \cdot F \cdot V^2 - P_{fx}$
Мінімальна усталена швидкість, м/с	$V_{\min y} = -\frac{m_a g f_0 A_i - K_B F C_i}{m_a g K_f A_i - K_B F B_i} + \sqrt{\left(\frac{m_a g f_0 A_i - K_B F C_i}{m_a g K_f A_i - K_B F B_i} \right)^2 - \frac{m_a g (f_0 B_i - K_f C_i)}{m_a g K_f A_i - K_B F B_i}}$
Максимальна швидкість, м/с	$V_{\max} = \frac{-b_i - \sqrt{b_i^2 - 4a_i c_i}}{2a_i}$
Середня швидкість на швидкісній дорозі, м/с	$V_c = \frac{\sum S_i}{\sum t_i}$
Максимальне прискорення при розгоні, м/с ²	$j_{\max} = \frac{1}{G_a \delta_i} \left(c_i - \frac{b_i^2}{4a_i} \right)$
Середнє прискорення при розгоні, м/с ²	$j_{cpi} = \frac{1}{G_a \delta_i} \left[\frac{a_i}{3} (V_K^2 + V_K V_H + V_H^2) + \frac{b_i}{2} (V_K + V_H) + c_i \right]$
Максимальний долаємий підйом	$\sin \alpha_{\max} = \frac{1}{G_a \delta} \left(C_i - G_a g f_0 \cos \alpha - \frac{(B_i - G_a g K_f \cos \alpha)^2}{4A_i} \right)$
Швидкість на підйомі, м/с	$V_{\text{ном}} = \frac{-b_i - \sqrt{b_i^2 - 4a_i c_i}}{2a_i}$
Максимальна сила тяги на гаку, Н	$P_{KP_{\max}} = C_i - \frac{b_i^2}{4a_i}$
Середня швидкість на маршруті, м/с	$V_c = \frac{0,27 N_{yo} \eta_m \sum_{i=1}^n K_i d_i}{\frac{\gamma_{piN}}{l_i} \sum K_i d_i}$

Продовження табл.2
 Continuation of table.2

1	1
Коефіцієнти рівнянь	$a_i = A_i - K_B \cdot F, \quad b_i = B_i - K_f \cdot m_a \cdot g, \quad c_i = C_i - f_a \cdot m_a \cdot g;$ $A_i = a \cdot \frac{U_i^3 \cdot \eta_m}{r_d \cdot r_k^2}, \quad B_i = b \cdot \frac{U_i^2 \cdot \eta_m}{r_d \cdot r_k}, \quad C_i = c \cdot \frac{U_i \cdot \eta_m}{r_d},$ $a = \frac{M_{emin}}{A_{11}} + \frac{M_{emax}}{A_{12}} + \frac{M_{eN}}{A_{13}},$ $b = \left[\frac{(\omega_N + \omega_M) \cdot M_{emin}}{A_{11}} + \frac{(\omega_N + \omega_{min}) \cdot M_{emax}}{A_{12}} + \frac{(\omega_{min} + \omega_M) \cdot M_{eN}}{A_{13}} \right],$ $c = \left(M_{emin} \cdot \frac{\omega_M \cdot \omega_N}{A_{11}} + M_{emax} \cdot \frac{\omega_N \cdot \omega_{min}}{A_{12}} + M_{eN} \cdot \frac{\omega_{min} \cdot \omega_M}{A_{13}} \right);$ $\delta_i = 1 + \sigma_1 \times u_{ki}^2 + \sigma_2;$ $P_{fx} = (2 + 0,025 \cdot V) \cdot m_a \cdot g \cdot 10^{-3}, \quad H$ $\omega_M, \omega_N, \omega_{min}$ – частота обертання колінчастого валу двигуна в режимі максимального крутного моменту, максимальної потужності і мінімальна частота; U_i – передаточне відношення трансмісії автобуса на i-ій передачі; u_{ki} – передаточне відношення коробки передач автобуса на i-ій передачі $M_{emin}, M_{emax}, M_{eN}$ – мінімальний, максимальний і момент двигуна в режимі максимальної потужності; f_0 – коефіцієнт опору кочення за швидкості 1 м/с; f_a – коефіцієнт опору кочення при заданій швидкості; K_f – коефіцієнт, що враховує приріст коефіцієнта f від швидкості руху; V_K, V_H – кінцева і початкова швидкість в процесі розгону; $N_{уд}$ – питома потужність автобуса; η_m – коефіцієнт корисної дії трансмісії; K_i – відносний шлях руху автобуса на i-ій передачі γ_{piN} – питома тягова сила на i-ій передачі при роботі двигуна в режимі максимальної потужності; r_d, r_k – динамічний радіус і радіус кочення колеса.

За наведеним алгоритмом, табл.2, визначені показники тягово-швидкісних властивостей автобуса і автобусного поїзда, табл.3.

Таблиця 3 – Показники тягово-швидкісних властивостей автобуса і автобусного поїзда
 Table 3 – Indicators of traction and speed properties of the bus and bus train

	Назва показника	автобус	автобусний поїзд
1	2	3	4
1	максимальна швидкість при $\Psi = 0,02$, км/год	80	70
2	час розгону до $V=70/50$ км/год	87,5/29,8	182,3/56,2
3	-шлях розгону до $V=70/50$ км/год, м	1750/237,5	3856/485,5

Продовження табл.3
Continuation of table.3

1	2	3	4
4	- час розгону на п'ятій передачі, с	61,5	143,4
5	- шлях розгону на п'ятій передачі, м	1485	3272
6	середня швидкість, м/с	43,76	29,41
7	тах. прискорення при розгоні, м/с ²	2,2	1,18
8	тах. динамічний фактор на п'ятій передачі	0,042	0,027
9	усталена швидкість на зтяжних підйомах (3%), м/с	54,8	40,5

Аналіз даних табл. 3 показує на можливість використання автобусного поїзда при його роботі на міських маршрутах, на яких є обмеження максимальної швидкості руху на рівні 50 км/год. Якщо ж швидкість руху збільшується до 70 км/год, то використання автобусного поїзда у складі автобуса А70132 і причепа загальною масою 16000 кг стає малоефективним, так як різко збільшується час і шлях розгону і зменшується середня швидкість руху. Цьому можна завадити або збільшенням потужності двигуна автобуса, або активізацією причепа. Проте у будь-якому разі при створенні автобусного поїзда слід приділити більше уваги безпеці руху автобусного поїзда, і зокрема, конструкції причепа. Так, у розробленій конструкції причепа, розробленого німецькою компанією Göppel Bus, встановлені антиблокувальна гальмівна система і електронна система стабілізації руху, відеокамера контролю дверей, відеокамера контролю ситуацію в причепі під час руху, відеокамера для контролю попадання людей у зчпний проміжок, відеокамера для безпечного руху заднім ходом, автоматичні двері, що не допускають затиснення в них пасажирів, та пристрій для зв'язку пасажирів з водієм.

Висновки та рекомендації.

Показана перспективність використання причіпних пасажирських автопоїздів. Виконана порівняльна оцінка дизельного автобуса А70132 і електробуса А701 при їх роботі з причепом загальною масою 16000 кг. Доведена ефективність використання автобуса А70132 з причепом при його роботі на міських маршрутах, на яких є обмеження максимальної швидкості руху на рівні 50 км/год. При цьому встановлено, що використання електробуса для створення автобусного поїзда є проблематичним з погляду на відсутність запасу тягової сили в зоні підвищених навантажень, обумовлених розгоном автобуса. Якщо ж швидкість руху збільшується до 70 км/год, то використання такого автобусного поїзда стає малоефективним, так як різко збільшується час та шлях розгону і зменшується середня швидкість руху. Цьому можна завадити або збільшенням потужності двигуна автобуса, або активізацією причепа.

Перелік посилань

1. Maciej Marcin Michałek , Bartosz Patkowski , Tomasz Gawron. Modular Kinematic Modelling of Articulated Buses //Ieee transaction on vehicular technology, VOL. 69, NO. 8, AUGUST 2020.
2. <http://urbanua.org/dosvid/zakordonni-pryklady/225/> Автоцентр.ua > kommercheskie > avtobus-s-pritsepom-274056/
3. Пасажирські причепа для автобусів та тролейбусів. <http://urbanua.org/dosvid/zakordonni-pryklady/225/>
4. Сахно В.П., Безбородова Г.Б., Маяк М.М., Шарай С.М. Автомобілі. Тягово-швидкісні властивості та паливна економічність: навч. посіб. Київ, 2003, 153 с.
5. Волков В.П. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля: навч. посібник. Харків: ХНАДУ, 2003. – 292 с.
6. Солтус А.П. Теория эксплуатационных свойств автомобиля: учебное пособие для вузов. Киев: Аристей, 2004. – 188 с.
7. Сахно В.П., Корпач О.А. Математична модель для визначення тягово-швидкісних властивостей автомобіля при використанні двигунів різної потужності. Управління проектами, системний аналіз і логістика. Науковий журнал. Вип. 9. – НТУ, 2012. – С. 165-171.
8. <http://nash-transport.com/bus/bogdan-a701/>

9. Сахно В.П., Яценко Д.М., Диких О.В., Стельмашук В.В., Онищук В.П. До вибору типу двигуна при модернізації БТР-70. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. №2(15). – Луцький НТУ, 2020. — С.134-146.

ON THE QUESTION OF CREATING A TRAILER BUS TRAIN

Dykich Oleksandr V., magistr of transport, National Transport University, postgraduate student of Automobiles Department, e-mail: aleksandr.dik@ukr.net, +38 0679466542, <https://orcid.org/0000-0002-3511-3350>

Sakhno Volodymyr P., Doctor of Engineering Sciences, Professor, National Transport University, Head of Automobiles Department, e-mail: sakhno@ntu.edu.ua, +38 0676655344, <https://orcid.org/0000-0002-5144-7131>,
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7003877014>
<https://www.webofscience.com/wos/author/record/25153362>

Abstract. Hinged buses and bus trains are usually operated in large cities with heavy traffic. Therefore, the traction and speed properties of bus trains should be at the level of single buses. Among the 13 indicators of traction and speed properties that assess the dynamics of the road train, the most important are maximum speed, acceleration during acceleration, time and path of acceleration to maximum speed, acceleration time on the path of 400 and 1000 m. road trains. The A70132 diesel bus and the A701 electric bus were selected as the object of the study when working with the trailer. A comparative assessment of these buses on the indicators of traction and speed properties. It was found that the use of electric buses to create a bus train is problematic in view of the lack of traction in the area of high loads due to the acceleration of the bus. However, for a bus with diesel there is a significant reserve of traction in lower gears, due to the operation of the torque converter. The efficiency of using such a bus train when working on urban routes, where there is a limit on the maximum speed at 50 km / h. If the speed increases to 70 km / h, the use of a bus train consisting of a bus A70132 and a trailer with a total weight of 16,000 kg becomes inefficient. To increase the speed, it is necessary to either increase the power of the bus engine or activate the trailer.

Key words: bus, electric bus, trailer, bus train, traction-speed properties, power, efficiency of use.

References

1. Maciej Marcin Michałek , Bartosz Patkowski , Tomasz Gawron. Modular Kinematic Modelling of Articulated Buses //IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 69, NO. 8, AUGUST 2020.
2. <http://urbanua.org/dosvid/zakordonni-pryklady/225/Автоцентр.ua> > kommercheskie > avtobus-spritsepom-274056/
3. Passenger trailers for buses and trolleybuses. <http://urbanua.org/dosvid/zakordonni-pryklady/225> 4 [in Ukrainian].
4. V.P. Sakhno, G.B. Bezborodova, M.M. Mayak, S.M. Sharay Cars: Traction-speed properties and fuel efficiency / Textbook. manual/. - K: 2003, 153 c. [in Ukrainian].
5. Volkov V.P. Theory of operational properties of the car: textbook. manual. Kharkiv: KhNADU, 2003. - 292 p. [in Ukrainian].
6. Soltus A.P. The theory of operational properties of the car: a textbook for universities. Kyiv: Aristei, 2004. - 188 p. [in Russian].
7. Sakhno V.P., Korpach O.A. Mathematical model for determining the traction and speed properties of the car when using engines of different power. Project management, systems analysis and logistics. Scientific journal. Vip. 9. - NTU, 2012. - P. 165-171. [in Ukrainian].
8. <http://nash-transport.com/bus/bogdan-a701/>
9. Sakhno VP, Yashchenko DM, Dikih OV, Stelmashchuk VV, Onishchuk VP Before choosing the type of engine when upgrading the BTR-70. Modern technologies in mechanical engineering and transport. Scientific journal. №2 (15). - Lutsk NTU, 2020. — P.134-146. [in Ukrainian].