

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ АВТОБУСА НА МАРШРУТІ МЕТРОБУСА

Сахно В.П., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, svp_40@ukr.net, orcid.org/0000-0002-5144-7131

Корпач А.О., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, akorpach@ukr.net, orcid.org/0000-0002-7070-7883

Корпач О.А., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, korpach1988@gmail.com, orcid.org/0000-0002-2496-4395

MODELING BUS MOVEMENT ON METROBUS ROUTE

Sakhno V.P., Ph.D, Engineering (Dr.), National Transport University, Kyiv, Ukraine, svp_40@ukr.net, orcid.org/0000-0002-5144-7131

Korpach A.O., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, akorpach@ukr.net, orcid.org/0000-0002-7070-7883

Korpach O.A., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, korpach1988@gmail.com, orcid.org/0000-0002-2496-4395

Постановка проблеми.

Збільшення частки пасажирських перевезень в містах призводить до зниження якості функціонування їх транспортних систем. З цією проблемою стикаються як керівники і проектувальники транспортних систем міст, так і пересічні жителі. Одним із можливих рішень для покращення якості функціонування громадського транспорту є використання систем швидкісного автобусного транспорту (Bus Rapid Transit, BRT), які ще називають метробусом.

Система BRT – це високоякісна автобусна транспортна система, яка пропонує швидкий, зручний та економічний міський транспорт за рахунок використання виділених смуг для забезпечення високої частоти та швидкості руху автобусів, а також орієнтації на правильні маркетингові інструменти та високоякісне обслуговування клієнтів. BRT поєднує якість та масштабність залізничних перевезень і гнучкість автобусних перевезень.

Сьогодні найбільш розповсюдженими є системи BRT, що знаходяться в країнах, що розвиваються, зокрема, Латинської Америки та Азії. Проте, завдяки своїм перевагам, вони набувають популярності і у розвинених країнах, у тому числі в країнах Західної Європи та Північної Америки. Обговорення можливості запровадження та функціонування систем BRT не обійшло і України. Так, у 2017 році Київською міською державною адміністрацією (КМДА) було оголошено тендер на розробку техніко-економічного обґрунтування для системи метробуса. Планувалося дві лінії метробуса для з'єднання житлового масиву Вигурівщина-Троєщина з існуючими станціями метрополітену. Хоча цей проект так і не був реалізований, проте дискусії навколо нього продовжуються і досі [1].

Для оцінки ефективності функціонування системи метробуса, вибору та обґрунтування його рухомого складу, доцільно використовувати математичне моделювання, яке дозволяє на етапі проектування визначати основні експлуатаційні властивості окремих автобусів та параметри системи BRT в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню експлуатаційних властивостей рухомого складу метробуса присвячено ряд робіт.

Так в роботі [2] проаналізовано стан громадського транспорту в м. Києві та запропоновано маршрут метробуса, який з'єднує житловий масив Вигурівщина-Троєщина та найближчу станцію метрополітену «Почайна». Запуск метробуса на цьому маршруті дозволить скоротити тривалість руху на 18,5 хв.

Дослідження маневреності рухомого складу метробуса проведено в роботах [3-6].

В роботах [3] та [4] розглянуто показники маневреності триланкових зчленованих автобусів та встановлено, що поліпшити їх за рахунок компоновальних параметрів автобуса і причіпних ланок у граничних режимах руху, практично, неможливо. Такий автобус не вписується у допустиму смугу руху, регламентовану DIRECTIVE 2002/7/ЕС, а отже – виникає необхідність перебудови існуючої транспортної інфраструктури для експлуатації такого рухомого складу на лініях метробуса. Зменшити габаритну смугу руху можна за рахунок використання керованих коліс (осей) причепа.

Об'єктом досліджень приведених в роботах [5] та [6] є причіпні автобусні поїзди, що можуть використовуватись в системі метробуса.

У роботі [5] розглянуто чотири варіанти автобусних поїздів у складі тривісного автобуса загальною масою 24 т і комбінацій із двовісних і тривісних причепів та встановлено, що автобусний поїзд з першим причепом з рознесеними осями і передньою керованою віссю і другим причепом з наближеними осями значно кращий, порівняно з автопоїздом з двома причепами з наближеними осями і виконує вимоги DIRECTIVE 2002/7/EC.

У роботі [6] запропоновано формувати рухомий склад для перевезень у системі BRT з трьох однотипних автобусів MA3-206 загальною довжиною до 26 м і пасажиромісткістю до 220 пасажирів. Досліджено показники маневреності та встановлено, що триланковий причіпний автопоїзд значно перевищує триланковий шарнірно-зчленований автобус.

Порівняння витрати енергії та рівнів викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище системи BRT та легкового пасажирського транспорту проведено в дослідженні [7]. Встановлено, що впровадження системи BRT дозволяє суттєво скоротити витрату енергії та викиди у навколишнє середовище. Так, енергія, що затрачається на перевезення одного пасажирів в проаналізованих системах BRT, лежить у межах 1,7-7,6 МДж, в середньому – 3 МДж. Викиди вуглекислого газу при цьому становлять від 11% до 85% викидів легкових автомобілів.

У роботі [8] проаналізовано вплив кількості пасажирів, інтенсивності руху, ціни на паливо та використання чотирьох різних видів автобусів на вартість транспортного обслуговування у системі BRT міста Курітіба (Бразилія). Оцінювання споживання енергії проводилось для триланкового зчленованого автобуса, гібридного двовісного автобуса, гібридного зчленованого автобуса, плагін-гібридного двовісного автобуса з урахуванням різного навантаження та різних їздових циклів. Встановлено, що дволанковий гібридний автобус є найбільш доцільним для заміни триланкових зчленованих автобусів, що зараз експлуатуються на лініях метробуса в місті Курітіба.

Метою роботи є моделювання руху автобуса на маршруті метробуса з використанням їздових циклів, що його імітують для подальшого вибору та обґрунтування типу рухомого складу, його параметрів та режимів руху.

Виклад основного матеріалу.

Для оцінки показників експлуатаційних властивостей, зокрема, тягово-швидкісних властивостей, паливної економічності та токсичності автотранспортних засобів, доцільно використовувати їздові цикли, які найбільш повно відображають реальні експлуатаційні умови. Вони складаються із послідовних ділянок, які включають розгін, рух із сталою швидкістю, сповільнення і роботу двигуна в режимі мінімальної частоти обертання холостого ходу.

При математичному моделюванні руху автобуса необхідно задатися усередненим маршрутом з типовими фазами руху, отриманим з використанням реальних експлуатаційних даних та оцінювати на його основі тягово-швидкісні властивості та паливну економічність.

В дослідженні [1] запропоновано маршрут метробуса в м. Києві. Проаналізувавши дані щодо характеристики цього маршруту, для моделювання було обрано маршрут «вул. Милославська – ст. метро «Почайна», що налічує 13 зупинок та 12 ділянок маршруту між ними (табл. 1).

Таблиця 1 – Основні характеристики маршруту «вул. Милославська – ст. метро «Почайна»

Table 1 – Main characteristics of the route «Miloslavska str. - Pochayna metro station»

Номер ділянки	Назва ділянки	Довжина ділянки, м
1	вул. Милославська – вул. Марини Цветаєвої	560
2	вул. Марини Цветаєвої – Торговий центр (ТЦ «Маяк»)	700
3	Торговий центр (ТЦ «Маяк») – вул. Сержа Лифаря	540
4	вул. Сержа Лифаря – Універсам (ТЦ «Фестивальний»)	620
5	Універсам (ТЦ «Фестивальний») – вул. Теодора Драйзера	620
6	вул. Теодора Драйзера – Мікрорайон №1	700
7	Мікрорайон №1 – ж/м Райдужний	1350
8	ж/м Райдужний – Торгово-розважальний центр (ТРЦ «Skymall»)	1340
9	Торгово-розважальний центр (ТРЦ «Skymall») – Парк «Муромець»	1330
10	Парк «Муромець» – Супермаркет (ТРЦ «Блокбастер»)	1820
11	Супермаркет (ТРЦ «Блокбастер») – вул. Йорданська	830
12	вул. Йорданська – ст. метро «Почайна»	690

Було запропоновано імітувати кожну ділянку маршруту за допомогою ділянки їздового циклу одного з двох типів, кожна з яких включає в себе різні фази руху. Схеми ділянок їздового циклу зображено на рис. 1.

Так, до ділянки Типу 1 входять: 1 фаза – зупинки з метою посадки і висадки пасажирів I, 1 фаза розгону II, 1 фаза руху з усталеною швидкістю III та 1 фаза сповільнення IV. До ділянки Типу 2: 1 фаза зупинки з метою посадки і висадки пасажирів I, 2 фази розгону II, 2 фази руху з усталеною швидкістю III, 2 фази сповільнення IV та 1 фаза зупинки на маршруті V.

На основі запропонованих ділянок, було складено їздовий цикл, який складається з 12 ділянок. Характеристики їздового циклу наведено в табл. 2.

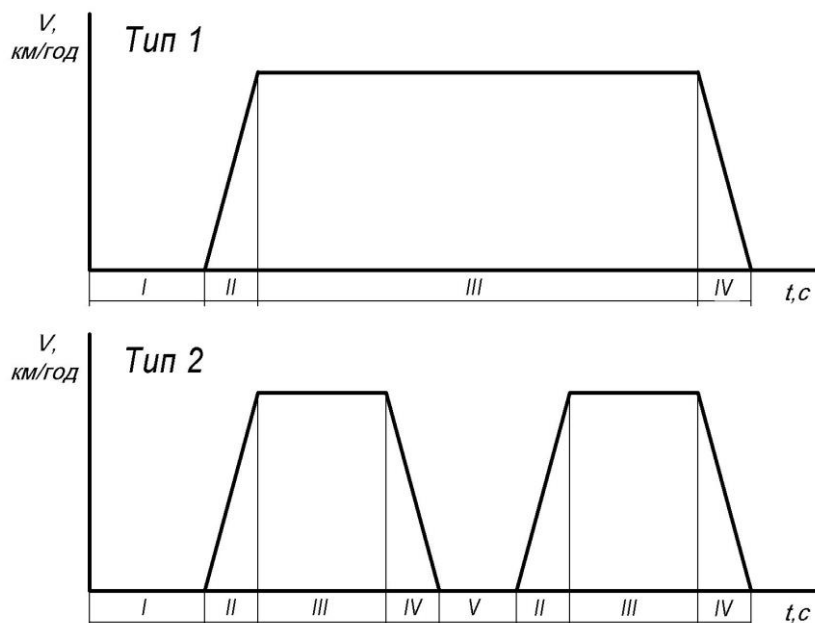


Рисунок 1 – Схеми ділянок їздового циклу.

Фази руху: I – зупинка для посадки і висадки пасажирів; II – розгін; III – рух з усталеною швидкістю; IV – сповільнення до повної зупинки; V – зупинка (перед світлофорним об'єктом); VI – сповільнення до повної зупинки та розгін до швидкості усталеного руху.

Figure 1 - Driving cycle sections schemes:

Phases of movement: I - stop for embarkation and disembarkation of passengers; II - acceleration; III - constant speed movement; IV - deceleration to stop; V - stop (at a traffic light); VI - deceleration to stop and acceleration to constant speed.

Довжини ділянок циклу обиралися такими, як і для запропонованого маршруту метробуса «вул. Милославська – ст. метро «Почайна» (табл. 1).

Час зупинки для посадки і висадки пасажирів (фаза I) було прийнято на рівні 30 сек., що відповідає середньому часу посадки і висадки пасажирів (20-35 сек) в існуючих системах метробуса та метрополітену.

Розгін автобуса (фаза II) в циклі відбувається за умови повного використання потужності двигуна з метою найшвидшого виходу на режим усталеного руху (фаза III).

Усталена швидкість руху автобуса (фаза III) визначається за умови можливості її досягнення на ділянці маршруту та за умови забезпечення мінімальної витрати палива. В розрахунках усталена швидкість руху приймається в межах 50-80 км/год. На ділянках довжиною до 1 км (8 зупинок) та на ділянці №7 (Мікрорайон №1 – ж/м Райдужний), що передбачає зупинку в межах ділянки вона складає 50-60 км/год, на ділянках довжиною понад 1 км – 50-80 км/год.

Сповільнення автобуса (фаза IV) за допомогою двигуна або гальмівної системи повинно забезпечувати рекомендоване середнє сповільнення для автобусів на рівні $j_{cn} = 1,5 \text{ м/с}^2$ [9].

Зупинка на маршруті, що визначається фазою V руху, імітує зупинку автобуса перед світлофорним об'єктом на перехресті вул. Милославської та просп. Генерала Ватутіна. Середня тривалість зупинок перед світлофором складає 30 сек, тому в розрахунках прийнято тривалість фази V руху – 30 сек.

Таблиця 2 – Характеристики їздового циклу
Table 2 - Driving cycle characteristics

№ ділянки	Довжина ділянки, м	Час зупинки для посадки-висадки пасажирів (фаза I), с	Час зупинки (фаза V), с	Тип ділянки їздового циклу	Швидкість усталеного руху, км/год
1	560	30	0	Тип 1	50, 55, 60
2	700	30	0	Тип 1	50, 55, 60
3	540	30	0	Тип 1	50, 55, 60
4	620	30	0	Тип 1	50, 55, 60
5	620	30	0	Тип 1	50, 55, 60
6	700	30	0	Тип 1	50, 55, 60
7	1350	30	30	Тип 2	50, 55, 60
8	1340	30	0	Тип 1	50, 60, 70, 75, 80
9	1330	30	0	Тип 1	50, 60, 70, 75, 80
10	1820	30	0	Тип 1	50, 60, 70, 75, 80
11	830	30	0	Тип 1	50, 55, 60
12	690	30	0	Тип 1	50, 55, 60
ВСЬОГО	11100	360	30		

Основними показниками, які будуть визначатися при математичному моделюванні є:

- час руху на ділянці маршруту t_i ;
- витрата палива на ділянці маршруту Q_i ;
- середня швидкість на ділянці маршруту $v_{срi}$.

Визначати і досліджувати показники експлуатаційних властивостей досить складної механічної системи "автомобіль" та аналізувати вплив на неї зовнішніх чинників (водія, дороги) найкраще на математичній моделі, що базується на диференціальному рівнянні прямолінійного руху [10]:

$$\frac{dV}{dt} \cdot M_a \cdot \delta_{об} = P_{кол}(V) - P_{он}(V, V^2) \pm G_a \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

де M_a – повна маса автомобіля, кг;

$\delta_{об}$ – коефіцієнт, який урахує обертові маси автомобіля;

$P_{кол}(V)$ – повна колова сила на ведучих колесах автомобіля, Н;

$P_{он}(V, V^2)$ – сума сил опору руху автомобіля, які залежать від швидкості його руху, Н;

$G_a \cdot \sin \alpha$ – сила опору підйому, Н;

G_a – сила тяжіння від повної маси автомобіля, Н;

α – кут поздовжнього нахилу полотна дороги, град;

V – швидкість руху автомобіля, м/с;

$\frac{dV}{dt}$ – прискорення автомобіля, м/с².

Зважаючи на те, що аналітичну функцію для сили $P_{кол}(V)$ точно визначити неможливо, зазначене диференціальне рівняння (1) другого порядку із сталими коефіцієнтами є таким, що в загальному випадку не інтегрується. Проте, його інтегрування можна провести, якщо вважати, що функція $P_{кол}(V)$ задана або визначена, наприклад, коли розглядати роботу двигуна за швидкісною зовнішньою характеристикою. В такому випадку розв'язок рівняння буде залежати від великої кількості параметрів, які доцільно розбити на дві групи.

До першої групи віднесені конструктивні параметри автомобіля та вихідні характеристики робочих процесів його агрегатів, що впливають на остаточні показники руху автомобіля. Другу групу складають параметри, що характеризують дорожні умови та взаємодію коліс автомобіля з опорною поверхнею.

Основною змінною у диференціальному рівнянні руху автомобіля є лінійна швидкість руху. У зв'язку з цим для інтегрування рівняння всі члени його правої частини мають бути виражені відносно лінійної швидкості руху.

Таким чином, для розв'язання рівняння руху автомобіля необхідно виразити повну колову силу та сили опору руху через лінійну швидкість руху автомобіля.

Для розрахункового визначення витрати палива автобуса у різних фазах руху була використана методика, запропонована в роботах [11-12].

У режимі усталеного руху з постійною швидкістю (фаза III циклу) витрата палива визначається за залежністю:

$$Q_i = k_Q \cdot Q_{oc} \cdot \tau_y, \quad (2)$$

де k_Q – коефіцієнт корекції витрати палива;

Q_{oc} – секундна витрата палива, кг/с;

τ_y – час руху автобуса зі сталою швидкістю, с.

Секундна витрата палива визначається:

$$Q_{oc} = a_{Qc} \cdot V^2 + b_{Qc} \cdot V + c_{Qc}, \quad (3)$$

де

$$a_{Qc} = \frac{a_Q \cdot U_i^2}{3600 \cdot r_k^2}, b_{Qc} = \frac{b_Q \cdot U_i}{3600 \cdot r_k}, c_{Qc} = \frac{c_Q}{3600}, \quad (4)$$

U_i – загальне передаточне число трансмісії автобуса на i -ій передачі;

r_k – радіус кочення колеса, м.

a_Q, b_Q, c_Q – коефіцієнти апроксимації функції годинної витрати палива двигуна :

$$Q_o = a_Q \cdot \omega^2 + b_Q \cdot \omega + c_Q. \quad (5)$$

де ω – кутова швидкість обертання колінчастого валу двигуна, рад/с;

За наявності швидкісних зовнішніх характеристик двигунів коефіцієнти a_Q, b_Q, c_Q визначаються за допомогою інтерполяційної формули Лагранжа за умови, що:

$$Q_o = \frac{g_e \cdot N_e}{1000}, \quad (6)$$

де g_e – питома витрата палива, г/(кВт·год),

N_e – потужність двигуна, кВт.

Остаточні коефіцієнти a_Q, b_Q, c_Q :

$$\begin{aligned} a_Q &= \frac{((g_N \cdot N_{\max} - g_{\min} \cdot N_{\min}) \cdot (\omega_M - \omega_{\min}) - (g_M \cdot N_M - g_{\min} \cdot N_{\min}) \cdot (\omega_N - \omega_{\min}))}{1000 \cdot ((\omega_N^2 - \omega_{\min}^2) \cdot (\omega_M - \omega_{\min}) + (\omega_{\min}^2 - \omega_N^2) \cdot (\omega_N - \omega_{\min}))}, \\ b_Q &= \frac{\frac{(g_M \cdot N_M - g_{\min} \cdot N_{\min})}{1000} + a_Q \cdot (\omega_{\min}^2 - \omega_M^2)}{\omega_M - \omega_{\min}}, \\ c_Q &= \frac{g_{\min} \cdot N_{\min}}{1000} - a_Q \cdot \omega_{\min}^2 - b_Q \cdot \omega_{\min}. \end{aligned} \quad (7)$$

Найбільша достовірність витрати палива при частковому використанні потужності двигуна досягається при двох вихідних графіках залежності крутного моменту і годинної витрати палива від кутової швидкості валу двигуна і положення органу керування подачею палива. Зазначені характеристики дозволяють встановити зв'язок між годинною витратою палива при частковій і повній подачах палива для досліджуваного діапазону кутових швидкостей колінчастого валу двигуна. Проте, отримати їх можливо тільки експериментальним шляхом, визначивши навантажувальні характеристики конкретного двигуна при різних частотах обертання колінчастого валу.

При визначенні витрати палива, за умови часткового використання потужності двигуна, вводиться коефіцієнт корекції витрати палива k_Q , що визначається:

$$k_Q = a_{ki} \cdot k_i^2 + b_{ki} \cdot k_i + c_{ki}, \quad (8)$$

де, k_i – коефіцієнт використання потужності двигуна;

a_{ki}, b_{ki}, c_{ki} – коефіцієнти апроксимації функції $k_Q = f(k_i)$

Коефіцієнт використання потужності двигуна для визначення показників паливної економичності [12]:

$$k_i = \frac{M_a \cdot g \cdot (f_0 + K_f \cdot V) + K_B \cdot F \cdot V^2}{A_i \cdot V^2 + B_i \cdot V + C_i}, \quad (9)$$

де M_a – повна маса автобуса, кг;

f_0 – коефіцієнт опору кочення при малих швидкостях руху;

K_f – коефіцієнт, що враховує зміну коефіцієнту опору кочення при збільшенні швидкості руху;

ρ – густина повітря, кг/м³;

C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору;

F – лобова площа, м²;

A_i, B_i, C_i – коефіцієнти апроксимації рівняння колової сили:

$$A_i = a \cdot \frac{U_i^3 \cdot \eta_m}{r_\partial r_\kappa^2}, \quad B_i = b \cdot \frac{U_i^2 \cdot \eta_m}{r_\partial \cdot r_\kappa}, \quad C_i = c \cdot \frac{U_i \cdot \eta_m}{r_\partial}, \quad (10)$$

η_m – коефіцієнт корисної дії трансмісії;

r_∂ та r_κ – динамічний радіус та радіус кочення колеса, м;

a, b, c – коефіцієнти апроксимації крутного моменту двигуна, отриманої експериментальним шляхом:

$$a = \frac{M_N - M_{\kappa, \min} - \frac{M_{\kappa, \max} - M_{\kappa, \min}}{\omega_M - \omega_{\min}} \cdot (\omega_N - \omega_{\min})}{\omega_N^2 - (\omega_M + \omega_{\min}) \cdot \omega_N - \omega_{\min}^2 + (\omega_M + \omega_{\min}) \cdot \omega_{\min}};$$

$$b = \frac{M_{\kappa, \max} - M_{\kappa, \min}}{\omega_M - \omega_{\min}} - a \cdot (\omega_M + \omega_{\min}) \cdot \omega_{\min};$$

$$c = M_{\kappa, \min} - a \cdot \omega_{\min}^2 - b \cdot \omega_{\min}, \quad (11)$$

де $\omega_{\min}, M_{\kappa, \min}$ – мінімальна кутова швидкість колінчастого вала двигуна, с⁻¹, та крутний момент, Н·м, при цій кутовій швидкості;

$M_{\kappa, \max}, \omega_M$ – максимальний крутний момент двигуна, Н·м, та кутова швидкість колінчастого вала двигуна, с⁻¹, що йому відповідає;

M_N, ω_N – крутний момент, Н·м, та кутова швидкість колінчастого вала двигуна, с⁻¹, що відповідають його максимальній потужності.

Час руху автобуса τ_i зі сталою швидкістю є відношення різниці між загальною довжиною ділянки маршруту S_i та шляху розгону S_{pi} і гальмування S_{zi} на даній ділянці до швидкості усталеного руху v_i .

Час руху автобуса τ_i зі сталою швидкістю:

$$\tau_i = \frac{S_i - S_{pi} - S_{zi}}{v_i}. \quad (12)$$

Шлях розгону S_{pi} визначається за залежністю:

$$S_{pi} = M_a \delta_{об} \int_{V_n}^{V_k} \frac{V dV}{a_i V^2 + b_i V + c_i}. \quad (13)$$

де $\delta_{об}$ – коефіцієнт, який враховує обертові маси автобуса;

V_n, V_k – початкова і кінцева швидкості руху автобуса, м/с;

a_i, b_i, c_i – коефіцієнти правої частини диференційного рівняння руху автобуса [10]:

$$\begin{aligned} a_i &= A_i - 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot F, \\ b_i &= B_i - K_f \cdot M_a \cdot g, \\ c_i &= C_i - f_0 \cdot M_a \cdot g \end{aligned} \quad (14)$$

Шлях гальмування визначається, як:

$$S_{zi} = \frac{(V_n - V_k)^2}{2 \cdot j_{cn}}, \quad (15)$$

де V_n, V_k – початкова і кінцева швидкості руху автобуса, м/с;

j_{cn} – сповільнення автобуса, м/с².

Витрата палива при неусталеному русі за повного використання потужності двигуна (фаза II та частина фази VI циклу), що відповідає режимам розгону автобуса, визначається залежністю:

$$Q_i = M_a \cdot \delta_{об} \cdot \int_{V_n}^{V_k} \frac{a_{Qc} \cdot V^2 + b_{Qc} \cdot V + c_{Qc}}{a_i \cdot V^2 + b_i \cdot V + c_i} dV. \quad (16)$$

Час розгону визначається за залежністю, с:

$$\tau_{pi} = M_a \cdot \delta_{об} \cdot \int_{V_n}^{V_k} \frac{dV}{a_i \cdot V^2 + b_i \cdot V + c_i}. \quad (17)$$

Витрата палива автобусом при роботі його двигуна на холостому ході (фази I та V циклу) Q_{xx} визначається з рівняння годинної витрати палива (2.4) за умови заданого часу роботи двигуна на х.х.:

$$Q_{xx} = k_{xx} \cdot (a_Q \cdot \omega_{xx}^2 + b_Q \cdot \omega_{xx} + c_Q) \cdot \frac{\tau_{xx}}{3600}, \quad (18)$$

де ω_{xx} – частота обертання холостого ходу двигуна, рад/с;

τ_{xx} – час роботи двигуна на холостому ході, с;

k_{xx} – коефіцієнт корекції. [12]

У режимах сповільнення автобуса (фаза IV циклу) при гальмуванні (двигуном, чи робочою гальмівною системою) витрата палива прийнята, як при роботі двигуна в режимі холостого ходу, адже на сучасних системах живлення дизеля подача палива в режимах примусового холостого ходу до певної частоти обертання колінчатого валу (1000 – 1600 хв⁻¹ в залежності від виду двигуна) та швидкості руху автобуса відсутня, а в подальшому – близька до витрати палива на холостому ході і визначається секундною витратою палива з урахуванням часу гальмування автобуса на i -й ділянці маршруту τ_{zi} .

$$Q_{zi} = k_{xx} \cdot (a_Q \cdot \omega_{xx}^2 + b_Q \cdot \omega_{xx} + c_Q) \cdot \frac{\tau_{zi}}{3600}, \quad (19)$$

де τ_{zi} – час гальмування, с;

Час гальмування τ_{zi} визначається за залежністю:

$$\tau_{zi} = \frac{V_n - V_k}{j_{cn}}. \quad (20)$$

Остаточно, витрата палива при виконанні автобусом запропонованого їздового циклу, є сумою витрат палива на i -х ділянках їздового циклу, кг:

$$Q_{\Sigma} = \sum Q_i. \quad (21)$$

Для приведення витрати дизельного палива з кілограм у літри використовується залежність:

$$Q = \frac{Q_{\Sigma}}{\rho_d}, \quad (22)$$

де ρ_d – густина дизельного палива, кг/л

Для порівняння витрати палива автобусів з різними повними масами, різною пасажиромісткістю було запропоновано визначати витрату палива на одного пасажиря, за залежністю, л/100 км:

$$Q_{\Pi} = \frac{Q}{n}, \quad (23)$$

де n – кількість пасажирів при повному завантаженні, чол.

Час руху на кожній ділянці циклу складається з суми часу руху на кожній фазі циклу, с:

$$\tau_i = \tau_{pi} + \tau_{yi} + \tau_{zi} + \tau_{xvi}. \quad (24)$$

Остаточно, час виконання автобусом запропонованого їздового циклу, є сумою часу руху на його i -х ділянках їздового циклу, с:

$$\tau_{\Sigma} = \sum \tau_i. \quad (25)$$

Середня швидкість руху на кожній ділянці маршруту визначається, як, м/с:

$$V_{cp} = \frac{S_s}{\tau_i}. \quad (26)$$

Середня швидкість руху у запропонованому їздовому циклі, м/с:

$$V_{cp} = \frac{S}{\tau_{\Sigma}}. \quad (27)$$

Висновки.

В результаті проведених досліджень, запропоновано моделювати рух автобуса на маршруті метробуса «вул. Милославська – ст. метро «Почайна» з використанням їздового циклу, в якому кожна ділянка маршруту імітується за допомогою ділянки їздового циклу одного з двох типів та включає в себе різні фази руху. Визначено залежності для розрахунку та характеристики кожної фази руху запропонованого їздового циклу. В подальшому приведена методика, а також математична модель побудована на її основі, буде використовуватись для вибору та обґрунтування типу рухомого складу, що буде експлуатуватися на маршруті метробуса, а також його параметрів та режимів руху.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Троєщині запропонували проект Метробусу [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://kievinform.com/archives/1979>
2. Сахно В.П. До вибору маршруту руху метробуса в місті Києві / В.П. Сахно, А.О. Корпач, О.А. Корпач // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2021. – Вип. 1 (48). – С. 315-325.
3. Сахно В.П. Шляхи поліпшення маневреності метробуса / В.П. Сахно, І.С. Мурований, В.В. Стельмашук, В.П. Онищук, О.Є. Омельницький // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. – Луцький НТУ, 2018. – №2. – С.122-133.
4. Сахно В.П. Маневреність метробусів / В.П. Сахно, В.В. Біліченко, В.М. Поляков, О.Є. Омельницький // Вісник машинобудування та транспорту. – 2018. – № 2. – С. 106-118.
5. Сахно В.П. Вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на показники маневреності метробуса / В.П. Сахно, В.М. Поляков, С.М. Шарай, О.Є. Омельницький // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – 2018. – № 2. – С. 144-151.
6. Сахно В. П. До питання вибору рухомого складу в системі BRT / В. П. Сахно, В. М. Поляков, С. М. Шарай, Д. М. Ященко // Технічна інженерія. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2020. – Вип. 2(86). – С. 24–33. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-24-33](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-24-33).
7. Imam R. Energy Consumption and Environmental Impacts of Bus Rapid Transit (BRT) Systems / R. Imam, A. Jamrah // Jordan Journal of Civil Engineering. – 2012. – Volume 6, № 3. – P. 328-339.
8. Dreier D. The influence of passenger load, driving cycle, fuel price and different types of buses on the cost of transport service in the BRT system in Curitiba, Brazil / D. Dreier, S. Silveira, D. Khawidada, K. Fonseca, R. Nieweglowski, R. Schepanski // Transportation. – Springer, 2019. – № 46(6). – P. 2195–2242.
9. Литвинов А.С. Автомобиль: теория эксплуатационных свойств / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989. – 237 с.
10. Сахно В.П. Математична модель для визначення тягово-швидкісних властивостей автомобіля при використанні двигунів різної потужності. / Сахно В.П., Корпач О.А. //Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ – 2012. – Вип. 9. – С. 165 – 171.
11. Сахно В.П. Математична модель для визначення показників паливної економічності автомобіля з двигунами різної потужності при виконанні міського їздового циклу. / В.П. Сахно, О.А. Корпач // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2012. – Випуск 25. – С. 193 – 196.
12. Сахно В.П. Уточнена математична модель для визначення показників паливної економічності автомобіля з двигунами різної потужності при виконанні міського їздового циклу / В.П. Сахно, О.А. Корпач // Вісник СевНТУ: зб. Наук. пр. Вип. 142/2013. Серія:Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь, 2013. – С. 48 – 51.

REFERENCES

1. Troieshchyni zaproponuvaly proekt Metrobusu [Troieshchyna region offered metrobus project]. Retrieved from <https://kievinform.com/archives/1979> [in Ukrainian].
2. Sakhno, V.P., Korpach, A.O., Korpach, O.A. (2021). Do vyboru marshruta metrobusa u misti Kyievi [Metrobus route selection in Kyiv]. Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Seriiia «Tekhnichni nauky». Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk – The National Transport University Bulletin: A Scientific and Technical Journal, 1(48), 315-325 [in Ukrainian].
3. Sakhno, V.P., Murovanyi, I. S., Stelmashchuk, V. V., Onyshchuk, V. P., & Omelnytskyi O.Y. (2018). Shliakhy polipshennia manevrenosti metrobusa [Ways to improve metrobus maneuverability]. Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti – Modern technologies in mechanical engineering and transport., 2, 122-133[in Ukrainian].
4. Sakhno, V.P., Bilichenko, V.V., Polyakov, V.M., & Omelnytskyi O.Y. (2018). Manevrenist metrobusiv [Manoeuvrability of metrobuses]. Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Journal of Mechanical Engineering and Transport, 2, 106-118 [in Ukrainian].
5. Sakhno, V.P., Sharai, S.M., Polyakov, V.M., & Omelnytskyi O.Y. (2018). Vplyv konstruktivnykh i ekspluatatsiinykh faktoriv na pokaznyky manevrenosti metrobusa [The influence of constructional and operational factors on indicators of maneuverability of the metrobus]. Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu. Seriiia : Tekhnichni nauky – The Journal of Zhytomyr State Technological University / Engineering, 2, 144-151 [in Ukrainian].

6. Sakhno, V. P., Poliakov, V. M., Sharai, S. M., & Yashchenko, D. M. (2020). Do pytannia vyboru rukhomoho skladu v systemi BRT [Revising the question of the choice of the rolling stock in the BRT system]. *Tekhnichna inzheneriia – Technical Engineering*, 2(86), 24–33[in Ukrainian].
7. Imam, R., & Jamrah, A. (2012). Energy consumption and environmental impacts of Bus Rapid Transit (BRT) systems. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 6(3), 328-339 [in English].
8. Dreier, D., Silveira, S., Khatiwada, D., Fonseca, K. V., Nieweglowski, R., & Schepanski, R. (2019). The influence of passenger load, driving cycle, fuel price and different types of buses on the cost of transport service in the BRT system in Curitiba, Brazil. *Transportation*, 46(6), 2195-2242 [in English].
9. Lytvynov, A. S., & Farobyn, Ya. E. (1989). *Avtomobyl: Teoriya ekspluatatsionnykh svoistv [Car: Theory of operational properties]*. Moscow.: Mashynostroenye [in Russian].
10. Sakhno, V. P., & Korpach, O. A. (2012). Matematychna model dlia vyznachennia tiahovoshvydkisnykh vlastyvostei avtomobilia pry vykorystanni dvyhuniv riznoi potuzhnosti [Mathematical model for determining vehicle traction-speed properties using engines with different power]. *Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka. Tekhnichna seriia – The National Transport University journal of Projects Management, System Analysis and Logistics*, 9, 165-171 [in Ukrainian].
11. Sakhno, V. P., & Korpach, O. A. (2012). Matematychna model dlia vyznachennia pokaznykiv palyvnoi ekonomichnosti avtomobilia z dvyhunamy riznoi potuzhnosti pry vykonanni miskoho yizdovoho tsykladu [Mathematical model for determining vehicle fuel efficiency with engines of different power during the urban driving cycle]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu – The National Transport University Bulletin*, 25, 193-196 [in Ukrainian].
12. Sakhno, V. P., & Korpach, O. A. (2013). Utochnena matematychna model dlia vyznachennia pokaznykiv palyvnoi ekonomichnosti avtomobilia z dvyhunamy riznoi potuzhnosti pry vykonanni miskoho yizdovoho tsykladu [Refined mathematical model for determining vehicle fuel efficiency with engines of different power during the urban driving cycle]. *Visnyk SevNTU. Ser.: Mashynopryladobuduvannia ta transport – The Sevastopol National Technical University Bulletin. Series: Mechanical engineering and transport*, 142, 48-51 [in Ukrainian].

РЕФЕРАТ

Сахно В.П. Моделирование руха автобуса на маршруті метробуса / В.П. Сахно, А.О. Корпач, О.А. Корпач // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К. : НТУУ, 2022. – Вип. 1 (51).

В статті запропоновано моделювати рух автобуса на маршруті метробуса з використанням їздових циклів, що його імітують.

Об’єкт дослідження – тягово-швидкісні властивості та паливна економічність автобуса.

Мета роботи – моделювання руху автобуса на маршруті метробуса з використанням їздових циклів, що його імітують.

Метод дослідження – аналітичний, математичне моделювання.

Для оцінки ефективності функціонування системи метробуса, вибору та обґрунтування його рухомого складу, доцільно використовувати математичне моделювання, яке дозволяє на етапі проектування визначати основні експлуатаційні властивості окремих автобусів та параметри системи в цілому.

Моделювання руху автобуса на маршруті метробуса запропоновано здійснювати шляхом використання їздового циклу, який найбільш повно відображає реальні експлуатаційні умови. Він складається із послідовних ділянок, які включають розгін, рух із сталою швидкістю, сповільнення і роботу двигуна в режимі мінімальної частоти обертання холостого ходу.

За основу було обрано маршрут метробуса «вул. Милославська – ст. метро «Почайна», що налічує 13 зупинок та 12 ділянок маршруту між ними. Кожна ділянка маршруту імітується за допомогою ділянки їздового циклу одного з двох типів та включає п’ять різних фаз руху.

Запропонований їздовий цикл та математична модель побудована на його основі дозволяє визначати показники тягово-швидкісних властивостей та паливної економічності, зокрема, час руху, середню швидкість та витрату палива автобуса на маршруті метробуса.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МЕТРОБУС, ШВИДКІСНИЙ АВТОБУС, ЇЗДОВИЙ ЦИКЛ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ТЯГОВО-ШВИДКІСНІ ВЛАСТИВОСТІ, ПАЛИВНА ЕКОНОМІЧНІСТЬ.

ABSTRACT

Sakhno V.P., Korpach A.O., Korpach O.A. Modeling bus movement on metrobus route. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2022. – Issue 1 (51).

The paper proposes to model bus movement on metrobus route using driving cycles.

Object of the study – bus traction-speed properties and fuel efficiency.

Purpose of the study – model bus movement on metrobus route using driving cycles.

Method of the study – analytical, mathematical modeling.

Mathematical modeling can be used to assess metrobus system effectiveness, selection and justification of its rolling stock. It allows at the design stage determine performance properties of individual bus or metrobus system as a whole.

Bus movement on metrobus route was proposed to model by using driving cycle, which reflects real operating conditions. It consists of successive sections, which include acceleration, movement with constant speed, braking and engine idle.

Metrobus route Miloslavskya St. – Pochayna metro station was chosen. It has 13 stops and 12 section. Each section of the route is simulated using a section of driving cycle one of two types and includes five different phases of movement.

Driving cycle and mathematical model built on its basis allows to determine parameters of bus traction-speed properties and fuel efficiency (travel time, average speed and fuel consumption).

KEYWORDS: METROBUS, BUS RAPID TRANSIT, DRIVING CYCLE, MATHEMATICAL MODEL, TRACTION-SPEED PROPERTIES, FUEL EFFICIENCY.

АВТОРИ:

Сахно Владимир Прохорович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри автомобілів, e-mail: svp_40@ukr.net, тел. +380442804252, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка 1. к.301, orcid.org/0000-0002-5144-7131

Корпач Анатолій Олександрович, кандидат технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри двигунів і теплотехніки, e-mail: akorpach@ukr.net, тел. +380442804716, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка 1. к.303, orcid.org/0000-0002-7070-7883

Корпач Олексій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри автомобілів, e-mail: korpach1988@gmail.com, тел. +380442804252, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка 1. к.306, orcid.org/0000-0002-2496-4395.

AUTHORS:

Sakhno Volodymyr P., Ph.D, Engineering (Dr.), professor, National Transport University, head of department of automobiles, e-mail: svp_40@ukr.net, tel. +380442804252, Ukraine, 01010, Kyiv, Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka Str. 1, of. 301, orcid.org/0000-0002-5144-7131

Korpach Anatolii O., Ph.D., professor, National Transport University, professor department of engines and heating engineering, e-mail: akorpach@ukr.net, tel. +380442804716, Ukraine, 01010, Kyiv, Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka Str. 1, of. 303, orcid.org/0000-0002-7070-7883

Korpach Oleksii A., Ph.D., associate professor, National Transport University, associate professor department of automobiles, e-mail: korpach1988@gmail.com, тел. +380442804252, Ukraine, 01010, Kyiv, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka Str. 1, of. 306, orcid.org/0000-0002-2496-4395.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Кравченко О.П., доктор технічних наук, професор, Державний університет «Житомирська політехніка», завідувач кафедри автомобілів і транспортних технологій, Житомир, Україна.

Матейчик В.П., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, декан автомеханічного факультету, Київ, Україна.

REVIEWER:

Kravchenko O.P., Ph.D, Engineering (Dr.), professor, Zhytomyr Polytechnic State University, head of the department of automobiles and transport technologies, Zhytomyr, Ukraine.

Mateichyk V.P., Ph.D, Engineering (Dr.), professor, National Transport University, dean of the faculty of automotive and mechanical engineering, Kyiv, Ukraine.