

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КУЗОВІВ АВТОБУСІВ ТА ПЕРЕВІРКА ЇЇ НА АДЕКВАТНІСТЬ

¹АТ «Черкаський автобус»

Розроблено математичну модель прогнозування довговічності кузовів автобусів. Модель дозволяє спрогнозувати ресурс кузова автобуса до початку руйнування елементів каркасу основи. В роботі розглянутий приклад моделі прогнозування довговічності кузова типу «Low-entry» автобуса «Атаман» А092Н6. Використані в моделі фактори, що впливають на довговічність каркасу кузова: мікропрофіль дороги, завантаження пасажирами, швидкість руху, сольова та атмосферна корозія. В основі моделі лежить система диференціальних рівнянь, що описують передачу збурень від мікропрофілю дороги через шини та підвіски до елементів каркасу кузова. В результаті попередніх досліджень визначено проблемні місця в елементах каркасу кузова. Такі місця і підлягають дослідженням під час моделювання. Модель працює таким чином. Спочатку визначаються вертикальні прискорення центра мас автобуса. Потім знаходиться приведенне значення прискорення в перерізі елемента, що досліджується. Перемноживши отримане прискорення на приведену масу в досліджуваному перерізі, визначається зусилля. Знаючи площу поперечного перерізу досліджуваного елемента, визначається напруження в цьому елементі. Площа поперечного перерізу елементів каркасу кузова буде постійно зменшуватись під дією корозії. Цю залежність отримано експериментальним шляхом. Встановлено, що динаміка зменшення товщини стінок труб каркасу буде залежати від кількості населення міста, де експлуатується автобус. Зі збільшенням кількості жителів інтенсивність корозії буде зростати, що і спричинятиме зменшення товщини труб. Після визначення часової діаграми напружень у досліджуваному елементі визначається спектральна густина, а потім, за формулою Райхера, можна визначити час до втомного руйнування досліджуваного елемента. Знаючи швидкість руху, можна визначити пробіг автобуса до появи втомної тріщини, що і зумовлює його довговічність. Розроблену модель реалізовано в програмному середовищі Matlab 2017b. Адекватність математичної моделі підтверджено дорожніми випробуваннями автобуса А092Н6, в яких визначено напруження в елементах, що підлягали дослідженню.

Ключові слова: автобус, математична модель, довговічність, каркас кузова, прогнозування.

Вступ

Як показує багаторічний досвід експлуатації, на довговічність автобусів впливає значна кількість чинників: конструкційні (матеріали, з яких виготовлений автобус; відповідність кузова умовам рівномірності), технологічні (ефективність та довговічність антикорозійного покриття); експлуатаційні (завантаження пасажирами, якість автомобільних доріг, швидкість руху, якість технічного обслуговування та антикорозійна обробка і як результат — інтенсивність корозії). Знаючи чинники впливу, важливо ще на стадії проектування оцінити ресурсні характеристики автобуса. Основною складовою автобуса, що в першу чергу обмежує його ресурс та є ідентифікатором для реєстрації (VIN), є кузов автобуса [1]. Тому важливо провести прогнозування довговічності кузова автобуса. Одним з ефективних способів розв'язання науково-прикладних задач є математичне моделювання [2]. На сьогодні набули широкого розповсюдження засоби автоматизованого проектування з можливостями імітаційного моделювання [3]—[5]. В процесі розробки методології оцінки довговічності кузова автобуса визначено основні критерії [6]: кількість пасажирів, що одночасно перевозяться, якість автомобільних доріг (мікропрофіль), швидкість руху автобуса та атмосферна і сольова корозія.

Досвід експлуатації автобусів громадського транспорту показує, що на маршрутах автобуси в години пік працюють з постійними перевантаженнями. Кількість одночасно перевезених пасажирів

рів в години пік досягає вісімдесяти при пасажиромісткості 52 пасажирів [7].

Швидкість руху в місті обмежена і не повинна перевищувати 50 км/год [8]. При цьому слід враховувати реалії експлуатації та не виключати можливість короточасних перевищень швидкості руху автобуса.

Параметри мікропрофілю доріг визначені та описані у вигляді кореляційних функцій та спектральної густини [9]—[11].

Корозійні процеси, що супроводжуються динамічними навантаженнями детально описані в монографії [12]. Також отримані залежності ступеня корозії від терміну експлуатації, пробігу та від кількості жителів у місті [13].

Як правило, розроблена модель потребує перевірки на адекватність. Адекватність розробленої моделі можна підтвердити зіставляючи з довговічністю автобуса в аналогічних експлуатаційних умовах. Завдяки розвитку сучасних електронних технологій [14] та можливості створення прогресивного програмного забезпечення [15] стає доступною перевірка на адекватність розробленої моделі. Перевірку можна виконати зіставивши результати моделювання на стадії визначення напружень в досліджуваному елементі каркасу кузова та визначивши напруження методом тензометрування в реальній експлуатації. Раніше авторами [16] проведено імітаційне моделювання в середовищі Matlab 7.0 та визначено вібронавантаження автовоза чи віброприскорення водія та пасажирів [17]. Однак моделювання з визначення довговічності кузовів автобусів ще не проводились.

Таким чином, *метою статті* є розробка математичної моделі прогнозування довговічності кузовів автобусів та перевірка її на адекватність до реальних умов експлуатації.

Результати дослідження

В основу математичного моделювання покладено суміщення навантажень у критичних вузлах основи каркасу кузова від нерівностей дороги, з одного боку, і пасажиронаповнення салону з другого (рис. 1), за паралельного, послідовного в часі погіршенні характеристик міцності труб каркасу під впливом корозії [6].

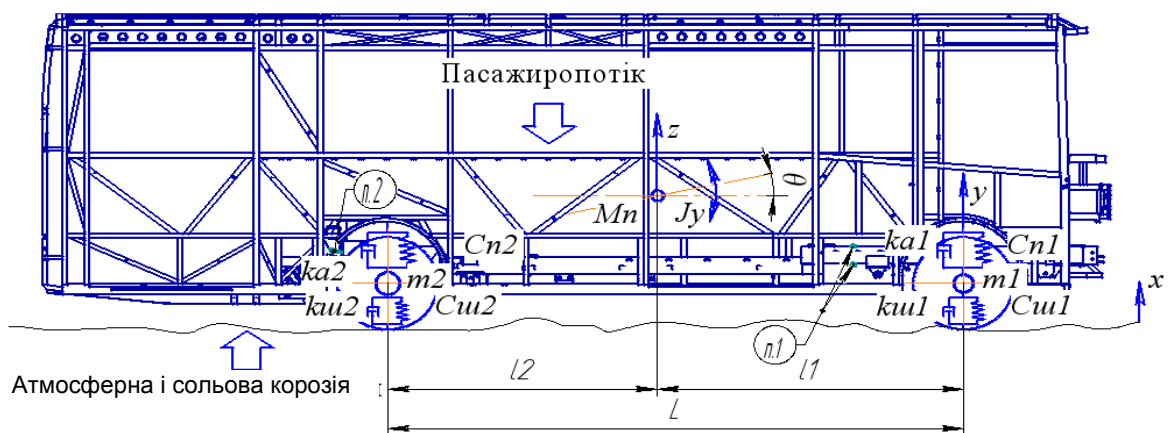


Рис. 1. Схема оцінки довговічності каркасу кузова автобуса

Для розробки математичної моделі підресореної системи використаємо рівняння Лагранжа другого роду [9]. В цьому випадку на цю динамічну систему, крім збудовувальних і потенційних сил, діють і сили опору, тому рівняння Лагранжа набудуть вигляду

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_k} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_k}, \quad (1)$$

де $k = 1, 2, \dots, n$; n — ступінь свободи динамічної системи; T — кінетична енергія системи; Π — потенціальна енергія системи; Φ — функція розсіювання (функція Релея); q_k — k -та узагальнена координата.

Для визначення коливань, зусиль та напружень в будь-яких вузлах каркасу кузова слід враховувати поздовжньо-кутові коливання. Тому ця динамічна система має чотири ступеня свободи. Її положення в просторі визначається чотирма узагальненими координатами $q_1 = x$; $q_2 = y$; $q_3 = z$; $q_4 = \Theta$.

Розглянемо вертикальні та позовжньо-кутові коливання підресорених мас автобуса M_{II} та не- підресорених мас m_1 та m_2 відносно статичної рівноваги

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \left(M_{II} \cdot \dot{z}^2 + J_y \cdot \dot{\Theta}^2 + m_1 \cdot \dot{x}_1^2 + m_2 \cdot \dot{x}_2^2 \right), \\ \Pi &= \frac{1}{2} \left[c_{III1} (y_1 - x_1)^2 + c_{III2} (y_2 - x_2)^2 + c_{II1} (x_1 - z - \Theta \cdot l_1)^2 + c_{II2} (x_2 - z + \Theta \cdot l_2)^2 \right], \\ \Phi &= \frac{1}{2} \left[k_{III1} (\dot{y}_1 - \dot{x}_1)^2 + k_{III2} (\dot{y}_2 - \dot{x}_2)^2 + k_{a1} (\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta} \cdot l_1)^2 + k_{a2} (\dot{x}_2 - \dot{z} + \dot{\Theta} \cdot l_2)^2 \right], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де l_1 та l_2 — відстань від вертикальної осі центру мас автобуса до вертикальної осі переднього та заднього колеса, відповідно; $L = l_1 + l_2$; J_y — момент інерції підресореної маси автобуса, що здійснює позовжньо-кутові коливання; Θ — кут, на який відхиляється автобус від горизонтальної осі під час позовжньо-кутових коливань; x , y , z — висота нерівностей мікропрофілю дороги, координати переміщення у вертикальній площині непідресорених та підресорених мас; k_{a1} , k_{a2} , c_{II1} , c_{II2} — коефіцієнти демпфування і жорсткості пружних елементів передньої та задньої підвісок; k_{u1} , k_{u2} , c_{u1} , c_{u2} — коефіцієнти демпфування і жорсткості коліс передньої та задньої осі.

Нерівності мікропрофілю дороги під передньою та задньою віссю повторюються із затримкою часу

$$\tau = \frac{l_1 + l_2}{V_a}, \quad (3)$$

де V_a — швидкість руху автобуса;

Дія мікропрофілю дороги на колеса передньої та задньої осі описується залежністю

$$x_1(t) = x_2(t + \tau). \quad (4)$$

Всі три функції (2) є знакозмінними додатними квадратичними формами швидкостей, координат вертикальних переміщень коліс автобуса, вертикальних переміщень та позовжньо-кутових коливань кузова автобуса.

Провівши диференціювання рівняння (2), отримаємо:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_k} \right) = \frac{1}{2} \left[2m_1 \cdot \ddot{x}_1 + 2m_2 \cdot \ddot{x}_2 \right] = m_1 \cdot \ddot{x}_1 + m_2 \cdot \ddot{x}_2; \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) = \frac{1}{2} M_{II} \cdot 2\ddot{z} = M_{II} \cdot \ddot{z}; \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\Theta}} \right) = \frac{1}{2} J_y \cdot 2\ddot{\Theta} = J_y \cdot \ddot{\Theta}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_1} = \frac{\partial T}{\partial x_2} = \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial \Theta} = 0; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial x_k} &= \frac{1}{2} \left[-2c_{III1} (y_1 - x_1) - 2c_{III2} (y_2 - x_2) + 2c_{II1} (x_1 - z - \Theta \cdot l_1) + 2c_{II2} (x_2 - z + \Theta \cdot l_2) \right] = \\ &= -c_{III1} (y_1 - x_1) - c_{III2} (y_2 - x_2) + c_{II1} (x_1 - z - \Theta \cdot l_1) + c_{II2} (x_2 - z + \Theta \cdot l_2); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z} = \frac{1}{2} \left[-2c_{II1} (x_1 - z - \Theta l_1) - 2c_{II2} (x_2 - z + \Theta l_2) \right] = -c_{II1} (x_1 - z - \Theta l_1) - c_{II2} (x_2 - z + \Theta l_2); \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \Theta} = \frac{1}{2} \left[-2c_{II1} l_1 (x_1 - z - \Theta l_1) + 2c_{II2} l_2 (x_2 - z + \Theta l_2) \right] = -c_{II1} l_1 (x_1 - z - \Theta l_1) + c_{II2} l_2 (x_2 - z + \Theta l_2); \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_k} = \frac{1}{2} \left[-2k_{\text{ш1}}(\dot{y}_1 - \dot{x}_1) - 2k_{\text{ш2}}(\dot{y}_2 - \dot{x}_2) + 2k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) + 2k_{a2}(x_2 - z + \Theta l_2) \right] = \quad (12)$$

$$= -k_{\text{ш1}}(\dot{y}_1 - \dot{x}_1) - k_{\text{ш2}}(\dot{y}_2 - \dot{x}_2) + k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) + k_{a2}(x_2 - z + \Theta l_2);$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}} = \frac{1}{2} \left[-2k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) - 2k_{a2}(x_2 - z + \Theta l_2) \right] = k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) - k_{a2}(x_2 - z + \Theta l_2); \quad (13)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \Theta} = \frac{1}{2} \left[-2k_{a1}l_1(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) + 2k_{a2}l_2(x_2 - z + \Theta l_2) \right] = -k_{a1}l_1(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) + k_{a2}l_2(x_2 - z + \Theta l_2); \quad (14)$$

Підставляємо отримані значення похідних (5)—(14) у рівняння Лагранжа (1)

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{п}}\ddot{z} - 0 &= - \left[-c_{\text{п1}}(x_1 - z - \Theta l_1) - c_{\text{п2}}(x_2 - z + \Theta l_2) \right] - \left[-k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) - k_{a2}(x_2 - z + \Theta l_2) \right], \\ J_y\ddot{\Theta} - 0 &= - \left[-c_{\text{п1}}l_1(x_1 - z - \Theta l_1) + c_{\text{п2}}l_2(x_2 - z + \Theta l_2) \right] - \left[-k_{a1}l_1(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) + k_{a2}l_2(x_2 - z + \Theta l_2) \right], \\ m_1\ddot{x}_1 - 0 &= - \left[-c_{\text{ш1}}(y_1 - x_1) + c_{\text{п1}}(x_1 - z - \Theta l_1) \right] - \left[-k_{\text{ш1}}(y_1 - \dot{x}_1) + k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) \right], \\ m_2\ddot{x}_2 - 0 &= - \left[-c_{\text{ш2}}(y_2 - x_2) + c_{\text{п2}}(x_2 - z + \Theta l_2) \right] - \left[-k_{\text{ш2}}(\dot{y}_2 - \dot{x}_2) + k_{a2}(x_2 - z + \Theta l_2) \right]. \end{aligned} \right\}$$

В результаті отримаємо

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{п}}\ddot{z} &= -(k_{a1} + k_{a2})\dot{z} - (c_{\text{п1}} + c_{\text{п2}})z + (-k_{a1}l_1 + k_{a2}l_2)\dot{\Theta} + (-c_{\text{п1}}l_1 + c_{\text{п2}}l_2)\Theta + k_{a1}\dot{x}_1 + c_{\text{п1}}x_1 + k_{a2}\dot{x}_2 + c_{\text{п2}}x_2, \\ J_y\ddot{\Theta} &= (-k_{a1}l_1 + k_{a2}l_2)\dot{z} + (-c_{\text{п1}}l_1 + c_{\text{п2}}l_2)z - (k_{a1}l_1^2 + k_{a2}l_2^2)\dot{\Theta} - (c_{\text{п1}}l_1^2 + c_{\text{п2}}l_2^2)\Theta + k_{a1}l_1\dot{x}_1 + \\ &\quad + c_{\text{п1}}l_1x_1 - k_{a2}l_2\dot{x}_2 - c_{\text{п2}}l_2x_2, \\ m_1\ddot{x}_1 &= k_{a1}\dot{z} + c_{\text{п1}}z + k_{\text{ш1}}\dot{y}_1 + c_{\text{ш1}}y_1 - (k_{\text{ш1}} + k_{a1})\dot{x}_1 - (c_{\text{ш1}} + c_{\text{п1}})x_1 + (k_{a1}\dot{\Theta} + c_{\text{п1}}\Theta)l_1, \\ m_2\ddot{x}_2 &= k_{a2}\dot{z} + c_{\text{п2}}z + k_{\text{ш2}}\dot{y}_2 + c_{\text{ш2}}y_2 - (k_{\text{ш2}} + k_{a2})\dot{x}_2 - (c_{\text{ш2}} + c_{\text{п2}})x_2 - (k_{a2}\dot{\Theta} + c_{\text{п2}}\Theta)l_2. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Для побудови імітаційної моделі в Matlab Simulink приведемо систему рівнянь (15) до вигляду

$$\left. \begin{aligned} \ddot{z} &= \frac{1}{M_{\text{п}}} \left[\begin{aligned} &- (k_{a1} + k_{a2}) \cdot \dot{z} - (c_{\text{п1}} + c_{\text{п2}}) \cdot z + k_{a1} \cdot \dot{x}_1 + c_{\text{п1}} \cdot x_1 + k_{a2} \cdot \dot{x}_2 + c_{\text{п2}} \cdot x_2 + \\ &+ (k_{a2}l_2 - k_{a1}l_1)\dot{\Theta} + (c_{\text{п2}}l_2 - c_{\text{п1}}l_1)\Theta \end{aligned} \right], \\ \ddot{\Theta} &= \frac{1}{J_y} \left[\begin{aligned} &(k_{a2}l_2 - k_{a1}l_1)\dot{z} + (c_{\text{п2}}l_2 - c_{\text{п1}}l_1)z - (k_{a1}l_1^2 + k_{a2}l_2^2)\dot{\Theta} - (c_{\text{п1}}l_1^2 + c_{\text{п2}}l_2^2)\Theta + k_{a1}l_1\dot{x}_1 + \\ &+ c_{\text{п1}}l_1x_1 - k_{a2}l_2\dot{x}_2 - c_{\text{п2}}l_2x_2 \end{aligned} \right], \\ \ddot{x}_1 &= \frac{1}{m_1} \left[k_{a1}\dot{z} + c_{\text{п1}}z + k_{\text{ш1}}\dot{y}_1 + c_{\text{ш1}}y_1 - (k_{\text{ш1}} + k_{a1})\dot{x}_1 - (c_{\text{ш1}} + c_{\text{п1}})x_1 + (k_{a1}\dot{\Theta} + c_{\text{п1}}\Theta)l_1 \right], \\ \ddot{x}_2 &= \frac{1}{m_2} \left[k_{a2}\dot{z} + c_{\text{п2}}z + k_{\text{ш2}}\dot{y}_2 + c_{\text{ш2}}y_2 - (k_{\text{ш2}} + k_{a2})\dot{x}_2 - (c_{\text{ш2}} + c_{\text{п2}})x_2 - (k_{a2}\dot{\Theta} + c_{\text{п2}}\Theta)l_2 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Під час моделювання в середовищі Matlab Simulink використані такі змінні величини: маса автобуса (без пасажирів; максимально допустима маса (52 пасажирів); при перевантаженні (80 пасажирів)), швидкість руху автобуса V_a (30 км/год, 50 км/год, 70 км/год), параметри мікропрофілю доріг x_i (з цементно-бетонним покриттям, асфальтним покриттям, бруківкою задовільної якості, бруківкою з впадинами та горбами).

Параметри мікропрофілю доріг задаються у вигляді послідовних дискретних значень ординат спектральної густини мікропрофілю для низки фіксованих значень частот. Відповідно використовується масив значень попередньо обчислених функцій спектральних густин досліджуваних доріг або проводиться їх розрахунок застосуванням апроксимованих залежностей.

В табл. 1 наведені розрахункові рівняння нормованих спектральних густин дії мікропрофілів автомобільних доріг, отримані фахівцями НАМІ за результатами дослідження на ділянках випробувальних доріг з відповідним мікропрофілем [18]. Ці рівняння будуть використані для моделювання.

Рівняння нормованих спектральних густин дії мікропрофільів автомобільних доріг [18]

Тип дорожнього покриття	Розрахункове рівняння
Цементно-бетонне покриття	$S^*(\omega) = \frac{0,048V_a}{\omega^2 + 0,0225V_a^2}$
Асфальтне покриття	$S^*(\omega) = \frac{0,054V_a}{\omega^2 + 0,04V_a^2} + \frac{0,0024V_a(\omega^2 + 0,36V_a^2)}{(\omega^2 - 0,36V_a^2)^2 + 0,0036V_a^4}$
Бруківка задовільної якості	$S^*(\omega) = \frac{0,143V_a}{\omega^2 + 0,2V_a^2}$
Бруківка із впадинами та горбами	$S^*(\omega) = \frac{0,135V_a}{\omega^2 + 0,25V_a^2} + \frac{0,0096V_a(\omega^2 + 4,04V_a^2)}{(\omega^2 - 3,96 \cdot V_a^2)^2 + 0,64V_a^4}$

В результаті розв'язання системи рівнянь (16) в імітаційному моделюванні в Matlab Simulink будуть отримані значення переміщень z центру підресорених мас автобуса M_{II} . Також будуть отримані значення кутів положення кузова за позовжньо-кутових коливань Θ .

Потім визначається сумарне переміщення перерізу, що підлягає дослідженню

$$z_{\Sigma} = z + l_i \cdot \sin \Theta, \quad (17)$$

де l_i — відстань від центру мас автобуса до перерізу, що досліджується.

Знайшовши похідну другого порядку від виразу (17) в Matlab Simulink, отримаємо прискорення досліджуваного перерізу \ddot{z}_{Σ} .

Для визначення зусиль F , що спричинені вертикальними переміщеннями кузова в досліджуваному перерізі, скористаємося другим законом Ньютона

$$F_i = M_{II} \cdot \ddot{z}_{\Sigma}. \quad (18)$$

Важливим параметром для дослідження накопичення втомної міцності елементів каркасу кузова є напруження σ_i , які визначаються за формулою:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{S_{III_i}}, \quad (19)$$

де S_{III_i} — площа поперечного перерізу елементів каркасу кузова, що відповідає масі M_{II} , m^2 .

Для визначення напружень σ_i в будь-яких заданих перерізах каркасу кузова автобуса необхідно виконати приведення підресореної маси M_{II} відносно центру мас до величини маси в перерізі, що досліджується M_{II} .

Площа поперечного перерізу S_{III_i} досліджуваних лонжеронів буде зменшуватись під дією корозії за рахунок зменшення товщини.

На інтенсивність корозії має вплив місто, де експлуатуються автобуси. У містах з чисельністю населення понад 1 млн. жителів (наприклад м. Київ) корозія відбувається приблизно в два рази швидше ніж у містах з чисельністю населення до 1 млн. жителів (наприклад м. Черкаси). Враховуючи досвід експлуатаційних організацій за цілорічної експлуатації автобусів, пробіг за 1 рік складає близько 100 тис. км.

Провівши аналіз корозійних процесів кузовів автобусів громадського транспорту від початку експлуатації до десяти років експлуатації, на основі статистичних даних, встановлено такі закономірності:

$$\Delta_I = \Delta_{\text{нов}}, \text{ якщо } L \leq 100 \text{ тис. км або } N \leq 2 \text{ роки;} \quad (20)$$

$$\Delta_{II} = k_{L_i} L + b_{L_i} \text{ або } \Delta_{II} = k_{N_i} N + b_{N_i}, \text{ якщо } L > 100 \text{ тис. км або } N > 2 \text{ років,} \quad (21)$$

де $\Delta_{\text{нов}}$ — початкова товщина труб каркасу; для труб 140×60×3,6 мм лонжеронів основи каркасу кузова $\Delta_{\text{нов}} = 3,6$ мм; L — пробіг автобуса, км; N — термін експлуатації автобуса, років;

k_{L_i}, b_{L_i} — коефіцієнти при визначенні товщини труб каркасу залежно від пробігу; k_{N_i}, b_{N_i} — коефіцієнти при визначенні товщини труб каркасу залежно від терміну експлуатації; i — індекс, що означає кількість населення у місті; 1 — до 1 млн. жителів; 2 — понад 1 млн. жителів.

В табл. 2 подано коефіцієнти залежностей (20), (21).

Таблиця 2

Коефіцієнти залежностей (20), (21)

Кількість населення	До 1 млн жителів				Більше 1 млн жителів			
	k_{L_1}	b_{L_1}	k_{N_1}	b_{N_1}	k_{L_2}	b_{L_2}	k_{N_2}	b_{N_2}
Числові значення	$2,856 \cdot 10^{-6}$	3,57	-0,2856	3,57	$-6,662 \cdot 10^{-6}$	4,33	-0,6662	4,33

Таким чином, враховуючи зменшення товщини труб каркасу автобуса Δ_i , при визначенні площі поперечного перерізу S_{IIIi} , можна визначити напруження σ_i за формулою (19) з урахуванням корозійних процесів, що відображають реальні умови експлуатації.

Для підтвердження адекватності моделювання на цьому етапі в середовищі Matlab Simulink отримано часову діаграму зміни деформацій лонжерону каркасу основи ε_i (рис. 2а) в одному з проблемних місць: за заднім кронштейном кріплення передньої лівої ресори на трубі каркасу основи (переріз $140 \times 60 \times 3,6$ мм) на відстані 1000 мм від осі передніх коліс (рис. 1), за швидкості 70 км/год, за спорядженої маси на дорозі першої категорії (взято параметри мікропрофілю для асфальтного покриття). Також проведено дорожні випробування автобуса та визначено напруження в тому самому місці (п. 1 на рис. 1) за таких самих умов (рис. 2б).

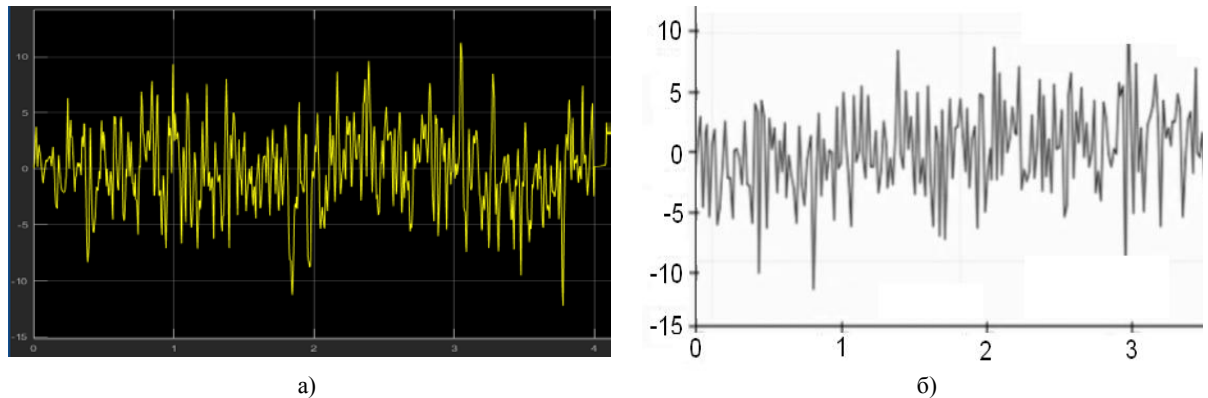


Рис. 2. Часові діаграми зміни деформацій лонжерону каркасу основи ε_i у одиницях відносної деформації (овд): а — в результаті моделювання; б — під час дорожніх випробувань

З рис. 2а та 2б видно, що результати моделювання та дорожніх випробувань лежать в тих самих межах, що підтверджує адекватність розробленої моделі на цьому етапі моделювання.

Потім здійснюється перехід залежності σ_i з часової області в частотну та розраховується спектральна густина $S_0(\omega)$ дії напружень σ_i .

Згідно з залежністю [19] довговічність в одиницях часу визначається за формулою

$$t = \frac{2\pi A}{\Delta^{m_N} (\sqrt{2})^{m_N} \Gamma\left(\frac{m_N + 2}{2}\right) \left(\int_{\omega} S_0(\omega) \cdot \omega^{\frac{m_N}{2}} d\omega \right)^{\frac{m_N}{2}}}, \quad (22)$$

де $\Delta = \sqrt{D}$ — стандартне відхилення поточних значень напружень σ_i ; D — дисперсія; $S_0(\omega) = \frac{S(\omega)}{D}$ — приведена спектральна густина дії напружень σ_i ; $\Gamma\left(\frac{m_N + 2}{2}\right)$ — гамма-функція;

A і m_N — характеристики кривої витривалості ($A = N \sigma_a^{m_N}$) [20].

Довговічність в одиницях пробігу визначається за формулою

$$S = V_a \cdot t. \quad (23)$$

Таким чином довговічність каркасу кузова автобуса визначається початком руйнування каркасу основи автобуса у проблемних місцях. Проблемні місця проявляються під час експлуатації на реальних маршрутах, в дослідженнях деформацій елементів каркасу кузова під час дорожніх випробувань та ще на стадії проектування.

Адекватність розробленої моделі підтверджено на основі порівняння з реальними умовами експлуатації автобуса «Атаман» А092Н6 на дорогах низької якості (бруківка з впадинами та горбами) за максимально допустимою швидкістю 50 км/год, за повного завантаження (в реальній експлуатації, в години пік, перевозилось до 80 пасажирів). На автобусах, що експлуатуються в жорстких умовах, втомні тріщини каркасу основи утворюються при пробігах в межах від 190 до 220 тис. км (на рис. 1, п. 2 показано місце утворення втомної тріщини). Наприклад, на одному з автобусів «Атаман» А092Н6, що експлуатується в м. Київ, втомна тріщина утворилась при пробігу 210039 км. Під час моделювання за відповідних вхідних параметрів пробіг склав 218523 км. Таким чином підтверджено адекватність розробленої моделі. Така модель працездатна і може бути використана у подальших дослідженнях.

Висновки

Вперше розроблено математичну модель прогнозування довговічності кузовів автобусів, що відображає їх експлуатацію на реальних маршрутах з перевезенням пасажирів на різних типах автомобільних доріг з урахуванням накопичення осередків втомної міцності, атмосферної і сольової корозії.

Дорожні випробування з визначенням напружень та пробігу до початку руйнування лонжерона каркасу основи за тих самих умов, що проводилось моделювання, показують відповідність результатам математичного моделювання та підтверджують адекватність розробленої математичної моделі.

Для подальшого вдосконалення розробленої математичної моделі слід врахувати можливе переміщення пасажирів у салоні автобуса, а також провести адаптацію для автобусів інших марок, що дозволить підвищити універсальність цієї моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] О. З. Горбай, К. Е. Голенко, і Л. В. Крайник, *Міцність та пасивна безпека автобусних кузовів*, монографія. Львів, Україна: вид-во Львівської політехніки, 2013, 276 с.
- [2] С. В. Звонарев, *Основы математического моделирования*, учеб. пос. Екатеринбург, Россия: изд-во Урал. ун-та, 2019, 112 с.
- [3] Dassault Systèmes Solid Works Corporation, 2020. URL: <https://www.solidworks.com/> (Last accessed: 10.03.2020).
- [4] Е. М. Alawadhi, *Finite Element Simulations Using ANSYS* CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014, 408 p.
- [5] Math. Graphics. Programming. 2020. URL: <https://www.matlab.com/> (Last accessed: 10.03.2020).
- [6] Д. П. Рубан, і Л. В. Крайник, «Методологія прогностичної оцінки ресурсної довговічності автобусів», *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, № 2 (11), Луцьк, 2018.
- [7] Д. П. Рубан, Л. В. Крайник, і Г. Я. Рубан, «Оцінка впливу введення площадок низького входу «low-entry» в структуру несівного кузова на ресурсні характеристики автобуса в експлуатації», *Автомобільний транспорт*, № 43, с. 31-35, Харків, 2018.
- [8] *Правила дорожнього руху*. 2020. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://vodiy.ua/pdf/>. Останнє звернення: 10.03.2020.
- [9] А. А. Силаев, *Спектральная теория поддресоривания транспортных машин*, 2-е изд. переработ. и доп. Москва: Машиностроение, 1972, 192 с.
- [10] А. А. Хачатуров, *Динамика системы «дорога–шина–автомобиль–дорога»*. Москва: Машиностроение, 1976. 535 с.
- [11] І. І. Кельман, *Основы забезпечення системної ефективності експлуатаційних властивостей автобусів*. Львів, Україна: вид. Мета, 2001, 200 с.
- [12] В. И. Похмурский, *Коррозионная усталость металлов*. Москва: Металлургия – Автодата, 1985, 207 с.
- [13] Д. П. Рубан, Л. В. Крайник, і Г. Я. Рубан, «Оцінка впливу корозії автобуса на фізичну міцність несівних елементів», в *Матеріали V Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції: Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*, Вінниця, 2018, с. 60-64.
- [14] Arduino. 2020. URL: <https://www.arduino.cc/> (Last accessed: 11.03.2020).
- [15] Харви Дейтел, Пол Дейтел. (2000) *Как программировать на С*. Москва, Россия: ЗАО «Издательство БИНОМ», 2000, 1008 с.
- [16] О. В. Житенко, і Л. В. Крайник, «Динаміка коливань і компонування автовоза», *Динаміка і міцність машин*. Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка», № 588, с. 31-35, 2007.
- [17] М. Ф. Бур'ян, і М. Ф. Боднар, «Оцінка плавності руху автобуса методом моделювання у системі Matlab/Simulink», *Динаміка, міцність та проектування машин і приладів: Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, № 838, с. 115-120, 2016.

[18] Я. М. Певзнер, і А. А. Тихонов, «Исследование статистических свойств микропрофиля основных типов дорог,» *Автомобильная промышленность*, № 1, с. 15-18, 1964.

[19] В. Л. Райхер, «Гипотеза спектрального суммирования и её применение к определению усталостной долговечности при действии случайных нагрузок,» *Проблемы надежности в строительной механике*. Вильнюс, 1968, с. 267-263.

[20] В. Т. Трощенко, и В. А. Сосновский, *Сопротивление усталости металлов и сплавов*, справ., ч. 1. Москва: Материаловедение, 1987.

Рекомендована кафедрою автомобілів та транспортного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 24.03.2020

Рубан Дмитро Петрович — канд. техн. наук, доцент, провідний інженер з якості, e-mail: ruban_dimon@ukr.net.

АТ «Черкаський автобус», Черкаси

D. P. Ruban¹

Mathematical Model of Forecasting Durability of Bus Bodies and Checking it for Adequacy

¹JSC «Cherkasy Bus»

A mathematical model for predicting the durability of bus bodies has been developed. The model allows you to predict the resource of the bus body before the destruction of the elements of the frame framework. The example of the model of predicting the durability of the body of type «Low-entry» bus "Ataman" A092H6 is considered in the work. Factors affecting the durability of the body frame are used in the model: road micro-profile, passenger loading, speed and climate corrosion. The model is based on a system of differential equations describing the transmission of perturbations from the road micro-profile through the tires and suspension to the body frame elements. As a result of previous studies, the problem areas in the body frame elements were identified. Such places are subject to research during modeling. The model works as follows. First, the acceleration in the center of mass of the bus is determined. Then there is a given value of acceleration in cross section of the element under study. Multiplying the obtained acceleration by the given mass in the test section determines the effort. Knowing the cross-sectional area of the element being investigated, the voltage in that element is determined. The cross-sectional area of the body frame elements will be steadily reduced by corrosion. This dependence was obtained experimentally. It is established that the dynamics of reducing the thickness of the walls of the pipe frame will depend on the population of the city where the bus is operated. With the increase in the number of inhabitants, the intensity of corrosion will increase, which will cause a decrease in the thickness of the pipes. After determining the time diagram of the stresses in the element under study, the spectral density is determined, and then, according to the Rice formula, it is possible to determine the time before the fatigue of the element under study. Knowing the speed of movement, you can determine the mileage of the bus to the appearance of fatigue cracks, which determines its durability. The developed model is implemented in the Matlab 2017b software environment. The adequacy of the mathematical model was confirmed by road tests of the A092H6 bus, in which the stresses in the elements to be simulated were determined.

Keywords: bus, mathematical model, durability, body frame, forecasting.

Ruban Dmytro P. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Leading Quality Engineer, e-mail: ruban_dimon@ukr.net

Д. П. Рубан¹

Математическая модель прогнозирования долговечности кузова автобуса и проверка её на адекватность

¹АО «Черкасский автобус»

Разработана математическая модель прогнозирования долговечности кузовов автобусов. Модель позволяет прогнозировать ресурс кузова автобуса до начала разрушения элементов каркаса основания. В работе рассмотрен пример модели прогнозирования долговечности кузова типа «Low-entry» автобуса «Атаман» А092Н6. В модели использованы факторы, влияющие на долговечность каркаса кузова: микропрофиль дороги, загрузка пассажирами, скорость движения и климатическая коррозия. В основе модели лежит система дифференциальных уравнений, описывающих передачу возмущений от микропрофиля дороги через шины и подвески к элементам каркаса кузова. В ходе предыдущих исследований определены проблемные места в элементах каркаса кузова. Такие места и подлежат исследованию при моделировании. Модель работает таким образом. Сначала определяется ускорение в центре масс автобуса. Затем находится приведенное значение ускорения в сечении исследуемого элемента. Умножив полученное ускорение на приведенную массу в исследуемом сечении определяется усилие. Зная площадь поперечного сечения исследуемого элемента, определяется напряжение в этом элементе. Площадь поперечного сечения элементов каркаса кузова будет постоянно уменьшаться под действием коррозии. Такая зависимость получена экспериментальным путем. Установлено, что динамика уменьшения толщины стенок труб каркаса будет зависеть от количества населения города, где эксплуатируется автобус. С увеличением количества жителей интенсивность коррозии будет расти, что и вызовет уменьшение толщины труб. После определения временной диаграммы напряжений в исследуемом элементе определяется спектральная плотность, а затем по формуле Райхера, можно определить время до усталостного разрушения исследуемого элемента. Зная скорость движения, можно определить пробег автобуса до появления усталостной трещины, что и определяет его долговечность. Разработанная модель реализована в программной среде Matlab 2017b. Адекватность математической модели подтверждена дорожными испытаниями автобуса А092Н6, в которых определено напряжение в элементах, подлежащих исследованию.

Ключевые слова: автобус, математическая модель, долговечность, каркас кузова, прогнозирование.

Рубан Дмитрий Петрович — канд. техн. наук, доцент, ведущий инженер по качеству, e-mail: ruban_dimon@ukr.net