

УДК 625.5

Горячев Ю. К., Куроп'ятник О. С.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ДОВЖИНИ НЕСУЧОГО КАНАТА ПІДВІСНОЇ ДОРОГИ ПІД ЧАС РУХУ ВАГОНА

Одним із видів транспорту, який доцільно використовувати для перевезення вантажів і людей в умовах наявності природних (ріки, різки та часті перепади рівня місцевості) або штучних (залізничні колії, автошляхи, будівлі та інші споруди) перешкод, а також при необхідності з'єднання кінцевих пунктів призначення, які розміщуються на різній висоті над рівнем моря, за найкоротшою відстанню, є підвісні канатні дороги, які з усіх видів транспорту найменш залежні від перелічених факторів.

За даними статистики [1], що відображає безпечність використання різних видів міського транспорту для здійснення пасажироперевезень, канатні дороги є найбільш безпечними, тоді як тролейбуси посідають друге місце (в чотири рази більше нещасних випадків), трамваї – третє (в 5 разів більше) та автотранспорт – четверте (у 8 разів більше). Але за останні роки безпека використання канатних доріг різних типів значно знизилася, що пояснюється збільшенням кількості імпортованих доріг, які перебували в експлуатації в інших країнах і не мають певної технічної документації, яка дозволяє встановлювати важливі показники подальшого використання споруди. Тому одним зі шляхів підвищення безпеки використання канатних доріг, і, зокрема, здійснення пасажироперевезень, є поліпшення умов проведення експертиз з метою встановлення необхідних технічних показників [2].

Іншою задачею є підвищення критеріїв безпечного використання доріг, які проектуються. Постановою Кабінету Міністрів України № 1631 від 15.10.2003 пасажирські підвісні канатні дороги віднесено до обладнання підвищеної небезпеки в складі вантажопідіймальних споруд, що вимагає підвищення точності методик проектного розрахунку та дослідження вже існуючих канатних доріг, а також впровадження сучасних технологій у системи керування та контролю.

Вирішенню першої частини проблеми значною мірою може сприяти математичне моделювання процесів, які супроводжують роботу дороги. Цьому питанню було присвячено роботу [3], в якій розглядається статичне навантаження канатних систем як вантових, але не враховано зміну параметрів, що визначають зусилля розтягу канатів, під час переміщення вагона. Результатам впровадження сучасних технологій та способів діагностики присвячено роботи [4–6], які майже не торкаються питань міцності елементів канатної дороги.

Одним із показників, які визначають навантаженість несучого каната підвісної дороги, а отже, його міцність і зносостійкість, є провисання, раціональні значення якого встановлюються з умов наближення вагона до споруд, які його оточують під час руху, зменшення зусилля розтягу тощо. Тому точність визначення вказаного параметра забезпечення дотримання його проектних значень є одним із засобів підвищення безпеки використання канатної колії, а отже, і дороги в цілому.

Величини параметрів провисання несучого каната забезпечуються за рахунок встановлення певної довжини останнього та його натягування до певної проектної межі. Однак під час переміщення вагона вздовж траси дороги канат зміщується, що зумовлено особливостями конструкції проміжних опор, внаслідок чого змінюються й параметри провисання, тому визначення меж їх зміни є необхідним для забезпечення зазначених вище вимог.

Метою даної роботи є розробка математичної моделі процесу перерозподілу довжини несучого каната підвісної дороги під час переміщення вагона.

Розглянемо довільний j -ий прогін маятникової підвісної дороги, в якому в даний момент часу розміщується вагон на відстані x_j від верхньої опори A (рис. 1). При цьому

враховуємо, що в більшості випадків такий прогін є найбільш навантаженим, оскільки несучий канат, окрім власної ваги, що вважається рівномірно розподіленим по хорді прогону AB навантаженням інтенсивністю q (погонна вага каната – характеристика за стандартом), сприймає також вагу вагона P (в цьому випадку і далі за текстом під вагою вагона розуміється сумарна вага металоконструкції та вантажу або пасажирів, які транспортуються). Винятком може бути дорога, яка містить прогони значної довжини та ухилу і характеризується відносно невеликою вагою вагона, що рідко зустрічається у вітчизняній практиці проектування підвісних канатних доріг.

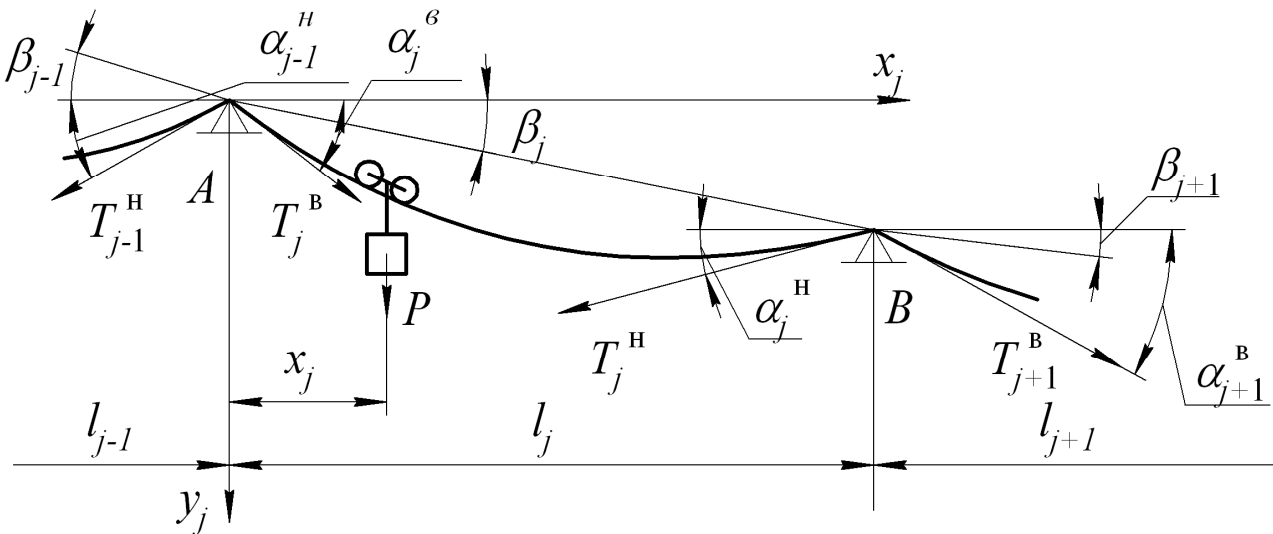


Рис. 1. Розрахункова схема досліджуваного прогону

Для моделювання найбільш загальної ситуації навантаження досліджуваній прогін є проміжним, що означає вільне розміщення несучого каната на башмаках опор А і В з можливістю переміщення. Такий процес супроводжується зміною параметрів провисання каната в кожному з прогонів, а отже, і його довжини, тому надалі пропонується називати зазначене явище процесом перерозподілу довжини несучого каната між прогонами підвісної дороги.

Під час переміщення вагона в досліджуваному j -ому прогоні змінюється навантаження канатів, що для несучого відображається у зміні зусиль у верхній (T_j^B) та нижній (T_j^H) точках його прилягання до опорних башмаків (див. рис. 1). Приймаючи до уваги те, що канат буде зміщуватися в бік j -ого прогону як найбільш навантаженого (у порівнянні з суміжними $(j-1)$ -им та $(j+1)$ -им), відзначаємо, що рівновага каната на опорних башмаках забезпечується певним співвідношенням зазначених вище зусиль та відповідних величин для суміжних прогонів, що може бути описано формулою Ейлера в наступному вигляді:

$$\begin{cases} \frac{T_j^B}{T_{j-1}^H} = \exp(mj_{j-1,j}); \\ \frac{T_j^H}{T_{j+1}^B} = \exp(mj_{j,j+1}), \end{cases} \quad (1)$$

де T_{j-1}^H – зусилля розтягу несучого каната біля нижньої опори ($j-1$)-го прогону; T_{j-1}^B – зусилля розтягу несучого каната біля верхньої опори ($j+1$)-го прогону; m – коефіцієнт тертя між несучим канатом та опорною поверхнею башмака; $j_{j-1,j}$, $j_{j,j+1}$ – кути контакту несучого каната з башмаками опор A і B .

При цьому вважається, що кожна наступна опора (в напрямку осі x_j) характеризується меншою висотною відміткою, ніж попередня.

Зазначені в системі (1) зусилля розтягу може бути визначено наступним чином [7]:

$$T_{j-1}^H = \frac{ql_{j-1}}{8g_{j-1} \cos b_{j-1}} \cdot \sqrt{1 + (tg b_{j-1} - 4g_{j-1})^2}; \quad (2)$$

$$T_{j+1}^B = \frac{ql_{j+1}}{8g_{j+1} \cos b_{j+1}} \cdot \sqrt{1 + (tg b_{j+1} + 4g_{j+1})^2}; \quad (3)$$

$$T_j^H = \frac{ql_j}{8g_j \cos b_j} \cdot \frac{1+2k_j}{k_{0j}} \cdot \sqrt{1 + (tg b_j - 4g_j \cdot k_{0j})^2}; \quad (4)$$

$$T_j^B = \frac{ql_j}{8g_j \cos b_j} \cdot \frac{1+2k_j}{k_{0j}} \cdot \sqrt{1 + (tg b_j + 4g_j \cdot k_{0j})^2}, \quad (5)$$

де l_{j-1} , l_j , l_{j+1} – довжини відповідних прогонів; b_{j-1} , b_j , b_{j+1} – кути нахилу хорд відповідних прогонів; γ_{j-1} , γ_j , γ_{j+1} – параметри провисання несучого каната у відповідних прогонах – відношення максимальної стріли провисання до довжини прогону, в якому вона виміряна; $k_j = P/(ql_j) \cdot \cos \beta_j$ – параметр навантаження каната; k_{0j} – поперечний коефіцієнт.

Вирази (4), (5) отримано на основі залежностей теорії гнучких ниток з використанням результатів роботи [8], що визначає зміст величин k_j та k_{0j} . Можливість застосування даної теорії до моделювання завантаженості канатів підвісних доріг обґрунтовано в роботі [7].

Оскільки довжина дуги опорного башмака значно менша за довжину прогону (не більше 1 %), кути контакту несучого каната з башмаками може бути визначено наступним чином:

$$j_{j-1,j} = a_j^B - a_{j-1}^H; \quad (6)$$

$$j_{j,j+1} = a_{j+1}^B - a_j^H, \quad (7)$$

де a_{j-1}^H – кут нахилу дотичної до кривої провисання несучого каната (кут нахилу канатної колії) біля нижньої опори ($j-1$)-го прогону; a_j^B , a_j^H – кути нахилу канатної колії біля верхньої та нижньої опор j -го прогону відповідно; a_{j+1}^B – кут нахилу канатної колії біля верхньої опори ($j+1$)-го прогону. Зазначені кути нахилу канатної колії може бути визначено з таких залежностей [7, 8]:

$$tg a_{j-1}^H = tg b_{j-1} - 4g_{j-1}; \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} a_j^B = \operatorname{tg} b_j + 4g_j \cdot k_{0j}; \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} a_j^H = \operatorname{tg} b_j - 4g_j \cdot k_{0j}; \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} a_{j+1}^B = \operatorname{tg} b_{j+1} + 4g_{j+1}. \quad (11)$$

Поєднуючи вирази (6)–(11), встановлюємо залежності для визначення кутів контакту:

$$\operatorname{tg} j_{j-1,j} = \frac{\operatorname{tg} b_j - \operatorname{tg} b_{j-1} + 4(g_j \cdot k_{0j} + g_{j-1})}{1 + (\operatorname{tg} b_j + 4g_j \cdot k_{0j})(\operatorname{tg} b_{j-1} - 4g_{j-1})}; \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} j_{j,j+1} = \frac{\operatorname{tg} b_{j+1} - \operatorname{tg} b_j + 4(g_j \cdot k_{0j} + g_{j+1})}{1 + (\operatorname{tg} b_j - 4g_j \cdot k_{0j})(\operatorname{tg} b_{j+1} + 4g_{j+1})}. \quad (13)$$

Реалізуючи умову рівноваги (1) з урахуванням виразів (2)–(5), маємо:

$$\frac{l_j}{l_{j-1}} \cdot \frac{g_{j-1}}{g_j} \cdot \frac{\cos b_{j-1}}{\cos b_j} \cdot \frac{1+2k_j}{k_{0j}} \cdot \sqrt{\frac{1 + (\operatorname{tg} b_j + 4g_j k_{0j})^2}{1 + (\operatorname{tg} b_{j-1} - 4g_{j-1})^2}} = \exp(mj_{j-1,j}); \quad (14)$$

$$\frac{l_j}{l_{j+1}} \cdot \frac{g_{j+1}}{g_j} \cdot \frac{\cos b_{j+1}}{\cos b_j} \cdot \frac{1+2k_j}{k_{0j}} \cdot \sqrt{\frac{1 + (\operatorname{tg} b_j - 4g_j k_{0j})^2}{1 + (\operatorname{tg} b_{j+1} + 4g_{j+1})^2}} = \exp(mj_{j,j+1}). \quad (15)$$

Поперечний коефіцієнт може бути визначено за формулою [8]:

$$k_{0j} = \frac{1}{\sqrt{1 - (1 - e_j^2)(1 - 2d_j)^2}}, \quad (16)$$

де $d_j = x_j / l_j$ – відносна координата розміщення вагона в досліджуваному прогоні;
 e_j – відношення натягів каната при $\delta_j = 0$ та $\delta_j = 0,5$;

$$e_j = \sqrt{\frac{1 + (\operatorname{tg} b_j + 4g_j)^2}{(1 + 2k_j)^2 + 4g_j \sin 2b_j (1 + 2k_j)(1 + k_j) + 16g_j^2 \cos^2 b_j (1 + k_j)^2}}. \quad (17)$$

Повна довжина несучого каната, яка перерозподіляється між прогонами під час руху вагона, є відомою з проекту дороги (або технічної документації – для імпортованих доріг, які вже були у використанні) величиною, яка поєднує основні параметри прогонів співвідношенням, отриманим за результатами роботи [9]:

$$L_k = \sum_{i=1}^{j-1} \left[l_i \left(1 + \frac{\operatorname{tg}^2 b_i}{2} + \frac{8}{3} g_i^2 \right) \right] + L_j + \sum_{i=j+1}^n \left[l_i \left(1 + \frac{\operatorname{tg}^2 b_i}{2} + \frac{8}{3} g_i^2 \right) \right], \quad (18)$$

де L_j – довжина каната, що розміщується в j -му прогоні; n – кількість прогонів дороги.

Формула для визначення величини L_j є відмінною від отриманої в роботі [9], тому що остання відповідає навантаженню каната лише власною вагою. Врахування ваги вагона відбивається на рівнянні кривої провисання несучого каната [8], тому вказана величина має визначатися за загальною формулою [7]:

$$L_j = \int_0^{l_j} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] dx, \tag{19}$$

де $y(x)$ – рівняння кривої провисання несучого каната в j -му прогоні;

$$y(x) = x_j \left[\operatorname{tg} \beta_j + 4\gamma_j k_{0j} \left(1 - \frac{x_j}{l_j} \right) \right]. \tag{20}$$

Здійснюючи необхідні математичні перетворення виразу (19) з урахуванням (20), маємо:

$$L_j = l_j \left[1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \beta_j}{2} + \frac{8}{3} \gamma_j^2 k_{0j}^2 \right], \tag{21}$$

отже, остаточно залежність (18) приймає вигляд:

$$L_K = \sum_{i=1}^{j-1} \left[l_i \left(1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \beta_i}{2} + \frac{8}{3} \gamma_i^2 \right) \right] + l_j \left[1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \beta_j}{2} + \frac{8}{3} \gamma_j^2 k_{0j}^2 \right] + \sum_{i=j+1}^n \left[l_i \left(1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \beta_i}{2} + \frac{8}{3} \gamma_i^2 \right) \right]. \tag{22}$$

Зі співвідношення (22) випливає, що процес перерозподілу довжини несучого каната залежить не лише від параметрів досліджуваного прогону та суміжних з ним, а визначається характеристиками дороги в цілому, що вказує на необхідність укрупнення математичної моделі з метою встановлення параметрів провисання каната в усіх прогонах.

Узагальнюючи отримані результати та поєднуючи вирази (12)–(17), (22), формуємо математичну модель процесу перерозподілу довжини несучого каната між прогонами підвісної дороги під час руху вагона в наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{aligned} \operatorname{tg} \beta_{j-1,j} &= \frac{\operatorname{tg} \beta_j - \operatorname{tg} \beta_{j-1} + 4(g_j \cdot k_{0j} + g_{j-1})}{1 + (\operatorname{tg} \beta_j + 4g_j \cdot k_{0j})(\operatorname{tg} \beta_{j-1} - 4g_{j-1})}; \\ \operatorname{tg} \beta_{j,j+1} &= \frac{\operatorname{tg} \beta_{j+1} - \operatorname{tg} \beta_j + 4(g_j \cdot k_{0j} + g_{j+1})}{1 + (\operatorname{tg} \beta_j - 4g_j \cdot k_{0j})(\operatorname{tg} \beta_{j+1} + 4g_{j+1})}; \\ \frac{l_j}{l_{j-1}} \cdot \frac{g_{j-1}}{g_j} \cdot \frac{\cos \beta_{j-1}}{\cos \beta_j} \cdot \frac{1 + 2k_j}{k_{0j}} \cdot \frac{\sqrt{1 + (\operatorname{tg} \beta_j + 4g_j k_{0j})^2}}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg} \beta_{j-1} - 4g_{j-1})^2}} &= \exp(mj_{j-1,j}); \\ \frac{l_j}{l_{j+1}} \cdot \frac{g_{j+1}}{g_j} \cdot \frac{\cos \beta_{j+1}}{\cos \beta_j} \cdot \frac{1 + 2k_j}{k_{0j}} \cdot \frac{\sqrt{1 + (\operatorname{tg} \beta_j - 4g_j k_{0j})^2}}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg} \beta_{j+1} + 4g_{j+1})^2}} &= \exp(mj_{j,j+1}); \\ k_{0j} &= \frac{1}{\sqrt{1 - (1 - e_j^2)(1 - 2d_j)^2}}; \\ e_j &= \sqrt{\frac{1 + (\operatorname{tg} \beta_j + 4g_j)^2}{(1 + 2k_j)^2 + 4g_j \sin 2\beta_j (1 + 2k_j)(1 + k_j) + 16g_j^2 \cos^2 \beta_j (1 + k_j)^2}}; \\ k_j &= \frac{P}{ql_j} \cdot \cos \beta_j; \quad j = \overline{1, n}; \\ L_K &= \sum_{i=1}^{j-1} \left[l_i \left(1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \beta_i}{2} + \frac{8}{3} g_i^2 \right) \right] + l_j \left[1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \beta_j}{2} + \frac{8}{3} g_j^2 k_{0j}^2 \right] + \sum_{i=j+1}^n \left[l_i \left(1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \beta_i}{2} + \frac{8}{3} g_i^2 \right) \right]. \end{aligned} \right. \tag{23}$$

ВИСНОВКИ

Аналіз особливостей формування та складових математичної моделі вказує на те, що процес перерозподілу довжини несучого каната між прогонами підвісної дороги не залежить від параметрів навантаження (власної ваги каната та ваги вагона) напряму, а визначається їх співвідношенням через параметр навантаження. Це дозволяє зробити висновок про те, що причиною впливу зазначених параметрів на досліджуваний процес є зосередженість ваги вагона в певній точці або її розподілення на достатньо обмеженій довжині. Отже, для кільцевий доріг, які характеризуються значною кількістю одиниць рухомого складу в прогоні, вага яких з достатнім з інженерних міркувань ступенем точності може вважатися рівномірно розподіленою по довжині хорди прогону і додаватися до власної ваги каната, процес перерозподілу довжини останнього визначається лише геометричними параметрами прогонів (кутом нахилу хорди та довжиною). Такими ж особливостями характеризується досліджуваний процес під час монтажу несучого каната підвісної дороги, оскільки навішування рухомого складу здійснюється після цього.

Особливості розробленої моделі та зазначене вище дозволяє зробити висновок про її універсальність, тобто можливість використання для проектування та дослідження як маятникових, так і кільцевих (з певним уточненням) вантажних та пасажирських підвісних доріг щодо визначення параметрів провисання як несучого, так і тягового канатів. Через зазначені параметри за формулами (2)–(5) може бути встановлено зусилля розтягу, що виникають у канаті, визначають його міцність та довговічність і впливають на безпеку перевезень зазначеним вище чином.

Не висвітленим лишається питання впливу на навантаженість канатів, зокрема несучого, напружень згинання, які також змінюються під час руху вагона та залежать від зусиль розтягу. Оскільки ступінь впливу вказаних напружень на максимальне зусилля в канаті досі не встановлено, розв'язання поставленого питання може вважатися напрямком подальшого розвитку досліджень в даній галузі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Олехнович А. И. Рациональные области применения пассажирских канатных дорог как средства городского транспорта / А. И. Олехнович // Труды ВНИИПТМАШ. Исследования канатных дорог. – 1969. – № 1. – С. 3–43.
2. Пірко В. М. Експертиза канатних доріг: досвід, проблеми, перспективи / В. М. Пірко // Матеріали міжнародних науково-практичних конференцій по підъемным сооружениям за 2005 год. Перспективы рынка лифтов, эскалаторов, канатных дорог в Украине (08-10.12.2005). – Одесса : Астропринт, 2006. – С. 212–215.
3. Шимановська М. О. Статика та формоутворення просторових вантових систем з проковзними вантами : автореферат дис. ... канд. техн наук : захищена 05.10.07 / Шимановська Марина Олександрівна. – К., 2007. – 21 с.
4. Сванидзе Л. Г. Связь вагонов канатной дороги со станциями / Л. Г. Сванидзе, В. Ф. Супрунов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2007. – № 5. – С. 41–43.
5. Сванидзе Л. Г. Окружные усилия на шкивах канатных дорог / Л. Г. Сванидзе, В. Ф. Супрунов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2008. – № 7. – С. 48–50.
6. Сванидзе Л. Г. Изоляция электрооборудования канатных дорог / Л. Г. Сванидзе, В. Ф. Супрунов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2008. – № 8. – С. 48–51.
7. Беркман М. Б. Подвесные канатные дороги / М. Б. Беркман [и др.]. – М. : Машиностроение, 1984. – 264 с. : ил.
8. Куропятник А. С. Уточнение к моделированию кривой провисания несущего каната маятниковой подвесной дороги / А. С. Куропятник // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Образование и наука XXI века». – София : «Бял ГРАД-БГ» ОДД, 2008.
9. Горячев Ю. К. Исследование влияния собственного веса на усилие в несущем канате маятниковой пассажирской подвесной дороги // Ю. К. Горячев, А. С. Куропятник // Матеріали за IV Міжнародна научна практична конференція «Научно пространство на Европа – 2008». Том 26. Технологии. – София : «Бял ГРАД-БГ» ОДД, 2008. – С. 71–77.