

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

УДК [625.576:539.37]-047.58

С. В. РАКША¹, Ю. К. ГОРЯЧЕВ², О. С. КУРОП'ЯТНИК^{3*}

¹Каф. «Прикладна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта raksha@ukr.net

²Каф. «Прикладна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18

^{3*}Каф. «Прикладна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта kuropyatnick@gmail.com

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПРУЖНИХ ДЕФОРМАЦІЙ НЕСУЧОГО КАНАТА НА ЗУСИЛЛЯ В ТЯГОВОМУ КАНАТІ ПІДВІСНОЇ ДОРОГИ

Мета. Оцінка впливу пружних деформацій несучого каната, які виникають під час руху вагона, на зусилля в тяговому канаті підвісної дороги. **Методика.** Для дослідження впливу пружних деформацій несучого каната на зусилля в тяговому канаті використовувався метод послідовних наближень. При цьому визначення натягу несучого каната здійснювалось із використанням методики, яка ґрунтується на принципах модульного компонування. Її сутність полягає у формуванні математичної моделі шляхом сполучення блоків формул, що описують рівновагу несучого каната на опорах. **Результати.** Аналіз отриманих результатів показав, що ряди послідовно визначених величин горизонтальної складової натягу несучого каната збігаються в четвертому наближенні (деякі й раніше) з точністю 0,1 %. Це вказує на можливість не враховувати зміни довжини несучого каната через пружні властивості під час моделювання навантаженості елементів контура «привод – тяговий канат – натяжний пристрій». Також встановлено, що використання натяжного пристрою підвищує вплив пружних властивостей несучого каната на елементи канатної системи та систему «привод – тяговий канат – натяжний пристрій» у цілому. При цьому пружна складова натягу несучого каната в досліджуваному прогоні не залежить від положення вагона в суміжному прогоні, а визначається лише параметрами канатної системи. **Наукова новизна.** Доведена можливість не враховувати зміни довжини несучого каната через пружні властивості під час моделювання навантаженості елементів контура «привод – тяговий канат – натяжний пристрій». **Практична значимість.** Використання наведених методик та отриманих результатів дозволить спростити математичні моделі навантаженості елементів канатної системи підвісної дороги та системи «привод – тяговий канат – натяжний пристрій» у цілому.

Ключові слова: підвісні канатні дороги; канатна система; несучий канат; тяговий канат; напружено-деформований стан

Вступ

Усі варіанти реальних практичних розрахунків каната, який провисає під дією вагових навантажень, можна звести до розв'язання двох задач:

1) канат з натяжним пристроєм (зазвичай, розміщеним біля нижньої опорної точки), який характеризується певним робочим зусиллям G_0 ;

2) канат із закріпленими на опорних точках кінцями, для якого відома довжина в недеформованому стані L_k .

В обох задачах, окрім вказаних величин, задаються: довжина l та перепад висот h прогону, модуль пружності E та площа металевого перерізу каната F , зміна температури Δt .

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

Метою розв'язання задач є визначення натягу та форми кривої провисання каната в прогоні з урахуванням пружних і температурних деформацій.

У роботах [1, 3, 6–13] розглядається як статика, так і динаміка підвісних канатних доріг. Проте не враховується взаємний вплив елементів канатної системи «несучий канат – тяговий канат» в умовах зміщення несучого каната уздовж опорних башмаків, який спричинений зміною навантаження на канат під час руху вагонів.

Вплив температурних деформацій на навантаженість несучого каната відображається в кількох аспектах. По-перше, зміна температури призводить до зміни об'єму. Оскільки довжина несучого каната підвісної дороги значно більша за площу поперечного перерізу, вважається, що температурна деформація відіб'ється у зміні довжини каната [3]

$$\Delta L_t = L_k \rho_t \Delta t,$$

де ρ_t – коефіцієнт температурної деформації; Δt – зміна температури відносно початкового стану.

Зміна довжини каната впливає на його початкову жорсткість, тому під час аналізу напружено-деформованого стану каната слід використовувати замість L_k величину $L_{kt} = L_k \pm \Delta L_t$ (знак «+» у разі збільшення довжини каната через температурну деформацію, «-» у разі її зменшення).

По-друге, вплив температури відбивається у зміні модуля пружності каната в цілому, який набуває вигляду функції двох змінних $E = E(\Delta t, \varepsilon)$, де ε – відносне значення пружної деформації, вплив якого не враховується під час виконання проектних розрахунків, але наявний у загальному випадку навантаження канатної системи [1].

Третій фактор впливу температурних деформацій – зміна погонної ваги каната [3]

$$q_t = q \frac{L_k}{L_k \pm \Delta L_t},$$

де q_t – уточнене значення погонної ваги каната.

Зазначені зміни мають взаємний вплив, а простежити їх комбінацію в межах канатної системи, більше того – контуру «привод – тяго-

вий канат – натяжний пристрій», є досить складним завданням з точки зору точного математичного формулювання. Тому перед виконанням досліджень доцільно перевірити вплив кожного з вказаних факторів на кінцевий результат відносно початкового (недеформованого) стану елементів канатної системи.

Щодо впливу зміни температури на напружено-деформований стан елементів канатної системи підвісної дороги слід зауважити, що період, який моделюється з метою дослідження навантаженості елементів контуру «привод – тяговий канат – натяжний пристрій», є порівняно невеликим (кілька хвилин), впродовж якого температура каната зміниться несуттєво, а отже, і вплив температурних деформацій є досить обмеженим. Це вказує на можливість не враховувати температурні деформації під час розв'язання сформульованих вище задач стосовно канатних систем підвісних доріг.

Згідно з [3] задачі розрахунку провисаючого каната можна вважати розв'язаними, якщо визначено параметр c ланцюгової лінії, яка є найбільш точною математичною моделлю непружного абсолютно гнучкого каната. Рівняння цієї кривої має вигляд

$$y(x) = c \operatorname{ch} \frac{x}{c}, \quad (1)$$

де x , y – абсциса та ордината певної точки кривої у плоскій декартовій системі координат.

Відомо [1], що заміна ланцюгової лінії параболою за умови провисання каната $f_{\max} / l \leq 0,1$ (що властиво більшості підвісних канатних доріг; f_{\max} – найбільше значення стріли провисання каната у прогоні) призводить до похибки розрахунку, яка не перевищує 2...3 %, що є прийнятним з огляду на нормативний запас міцності каната. При цьому суттєво спрощуються математичні моделі та з'являється можливість отримання основних залежностей в аналітичному вигляді, що є доцільним з точки зору оцінки впливу кожної з вихідних величин на розв'язок вказаних вище задач. Тому подальше моделювання з достатньою точністю можна виконувати, вважаючи криву провисання каната параболою.

Особливістю канатної системи двоканатних підвісних доріг є наявність канатів двох видів: несучого, який виконує роль підвісної колії,

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

уздовж якої рухаються вагони (або один вагон), та тягового, який забезпечує рух вагонів, передаючи тягове зусилля від привода. При цьому кількість канатів кожного виду може бути різною (наприклад, канатні системи більшості двоканатних пасажирських підвісних доріг мають один несучий і два тягові канати; також бувають конструкції з двома несучим канатами). У систему, якій властивий взаємний вплив елементів, їх об'єднує вагон, який перекочується колесами по несучому канату, а тяговий канат прикріплений до нього шарнірно. Тому постає питання щодо оцінки впливу зусилля в несучому канаті, яке зумовлюється вказаними вище величинами l , h , E , F та його власною вагою $q_n L_k$ (q_n – погонна вага каната), на навантаженість тягового каната, а отже, й усіх елементів контуру «привод – тяговий канат – натяжний пристрій».

Мета

Метою цієї роботи є оцінка впливу пружних деформацій несучого каната, які виникають під час руху вагона, на зусилля в тяговому канаті маятникової підвісної дороги.

Методика

Згідно з Правилами [5] під час виконання розрахунку тягового каната необхідно враховувати робоче зусилля натяжного пристрою, складові натягу каната від власної ваги та ваги рухомого складу (вагонів), опори в натяжних пристроях, опорних роликах і шківів на станціях. При цьому складовою натягу каната від ваги рухомого складу вважається опір переміщенню вагонів, який залежить, зокрема, від кута підйому вагона (γ). Враховуючи вплив параметрів тягового каната на форму кривої провисання несучого каната, величину γ можна визначити з умови [4]

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \beta + \frac{P \cos \beta + (q_n + q_t) l}{2H \cos \beta} \left(1 - 2 \frac{x}{l} \right), \quad (2)$$

де β – кут нахилу хорди прогону ($\operatorname{tg} \beta = h/l$); P – вага вагона; q_n , q_t – погонна вага несучого та тягового канатів відповідно; H – горизонтальна складова натягу несучого каната.

У загальному випадку зусилля в тяговому канаті може бути визначено за формулою [4]

$$T = PC_p \cos \gamma + P \sin \gamma + W, \quad (3)$$

де C_p – коефіцієнт опору руху вагона; W – складова натягу каната від власної ваги з урахуванням опорів у натяжних пристроях, опорних роликах і шківів на станціях;

$$W = T_0 + q_t (h + fl), \quad (4)$$

де T_0 – робоче зусилля натяжного пристрою, яке сприймається однією віткою тягового каната; f – коефіцієнт опору руху тягового каната.

Вплив пружних деформацій несучого каната відбивається в збільшенні його довжини, а отже, зменшенні натягу. Із виразу (2) видно, що зменшення натягу несучого каната (також горизонтальної складової H цієї величини) призведе до збільшення кута підйому вагона, що, згідно з формулою (3), підвищить навантаженість тягового каната.

Під час розв'язання задач статки провисаючого каната вплив його пружних властивостей можна оцінити, використовуючи метод послідовних наближень, особливість якого щодо розв'язання задач вказаного типу полягає в реалізації такого алгоритму [3]:

1) за вихідними даними (довжина l та перепад висот h прогонів, модуль пружності E та площа металевого перерізу каната F , а також робоче зусилля натяжного пристрою G_0) визначити (якщо не задано) довжину каната в недеформованому стані L_k ;

2) визначити середній натяг каната в недеформованому стані за формулою

$$T_{\text{ср}0} = 0,5(T_{\text{max}0} + T_{\text{min}0}), \quad (5)$$

де $T_{\text{max}0}$, $T_{\text{min}0}$ – найбільша й найменша величини натягу, які властиві найвищій та найнижчій точкам кривої провисання каната відповідно;

$$T_{\text{max}0} = H_0 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_0^B}, \quad (6)$$

$$T_{\text{min}0} = H_0,$$

де H_0 – горизонтальна складова натягу каната в недеформованому стані; α_0^B – кут нахилу дотичної до кривої провисання несучого каната в найвищій її точці;

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

3) визначити пружне видовження каната в першому наближенні за формулою

$$\Delta L_1 = L_k \frac{T_{\text{сер}0}}{EF}; \quad (7)$$

4) визначити уточнене значення довжини каната в першому наближенні за формулою

$$L_{k1} = L_k + \Delta L_1; \quad (8)$$

5) визначити уточнене значення максимального натягу в першому наближенні за формулою

$$T_{\text{max}1} = H_1 \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_1^B}, \quad (9)$$

де H_1 , α_1^B – уточнені значення відповідних величин у першому наближенні, формули для розрахунку яких залежать від умов задачі (канат з натяжним пристроєм чи із закріпленими кінцями);

6) визначити відхилення уточненого значення максимального натягу каната за першим наближенням від максимального натягу каната в недеформованому стані за формулою

$$\Delta T_1 = \frac{|T_{\text{max}1} - T_{\text{max}0}|}{T_{\text{max}0}} 100\%; \quad (10)$$

7) якщо $\Delta T_1 > \xi$ (зазвичай приймають $\xi \leq 1\%$ [1]), повторити розрахунки п. 3–7, використовуючи формули (7)–(10) у такому вигляді:

$$\Delta L_i = L_k \frac{T_{\text{сер}i-1}}{EF}; \quad (7a)$$

$$L_{ki} = L_k + \Delta L_i; \quad (8a)$$

$$T_{\text{max}i} = H_i \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_i^B}; \quad (9a)$$

$$\Delta T_i = \frac{|T_{\text{max}i} - T_{\text{max}i-1}|}{T_{\text{max}i-1}} 100\%, \quad (10a)$$

де $i = \overline{2, n}$ – порядок наближення розрахунку (розрахунок виконується для n наближень, доки $\Delta T_i > \xi$).

Розглянемо вплив деформацій несучого каната на навантаженість тягового каната (а отже, й усіх елементів контуру «привод – тяговий канат – натяжний пристрій») на прикладі підви-

сної канатної дороги маятникового типу з такими характеристиками:

– параметри профілю (рис. 1): перший прогін – $l_1 = 50$ м; $\beta_1 = 10^\circ$; другий прогін – $l_2 = 75$ м; $\beta_2 = 5^\circ$;

– вага завантаженого вагона $P = 50$ кН;
– погонна вага несучого та тягового канатів у недеформованому стані $q_n = 0,1263$ кН/м ($\varnothing 47$ мм за ГОСТ 7675-73) та $q_t = 0,01635$ кН/м ($\varnothing 21$ мм за ГОСТ 2688-80) відповідно;

– модуль пружності та площа поперечного перерізу несучого каната $E = 1,6 \cdot 10^5$ МПа та $F = 1476,62$ мм² відповідно;

– робоче зусилля натяжного пристрою: до несучого каната $G_0 = 460$ кН; до тягового каната $T_0 = 56,5/2 = 28,25$ кН (зусилля 56,5 кН, яке розвиває натяжний пристрій, сприймається двома вітками каната);

– коефіцієнти опору до формул (3) та (4) $C_p = 0,02$ [1], $f = 0,0065$ [4];

– відносне провисання несучого каната в обох прогонах вважаємо однаковим і рівним 0,02.

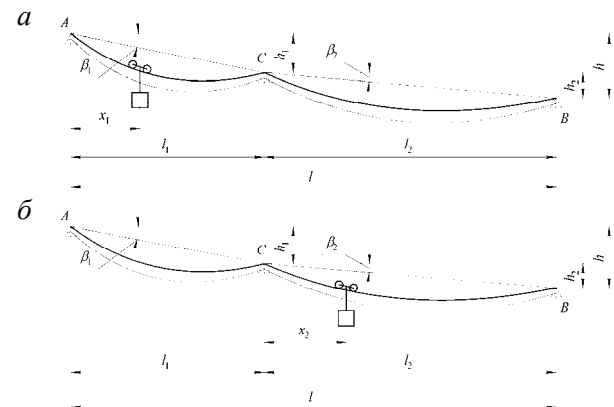


Рис. 1. Профіль дороги:

a – вагон у першому прогоні; *б* – вагон у другому прогоні

Розглянемо дві задачі: 1 – кінці несучого каната закріплені в точках *A* і *B*; 2 – у точці *B* несучий канат натягнуто пристроєм з робочим зусиллям G_0 . В обох випадках передбачено вільне переміщення каната уздовж опорного башмака, шарнірно закріпленого в точці *C*; коефіцієнт тертя в парі «несучий канат – опорний башмак» приймаємо $\mu = 0,16$.

Із точки *A* (верхня приводна станція) до точки *B* (нижня натяжна станція) рухається вагон вагою P . При цьому несучий канат зміщується

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

уздовж опорного башмака (точка C) для забезпечення статичної рівноваги двох відрізків каната AC і BC , один з яких завантажено рівномірно розподіленою вагою q_n (погонна вага каната) та зосередженою силою P , інший – лише вагою q_n . Вважаючи лінію контакту каната з башмаком (у площині поздовжнього профілю дороги) дугою кола, можна записати умову рівноваги відрізків AC і BC на опорі C у вигляді

$$T_1^H = T_2^B \exp \mu \varphi, \quad (11)$$

де T_1^H , T_2^B – зусилля в несучому канаті біля нижньої опори першого прогону та біля верхньої опори другого прогону відповідно; $\varphi = \alpha_2^B - \alpha_1^H$ – кут взаємодії каната з башмаком; α_1^H , α_2^B – кути нахилу дотичних до кривої провисання несучого каната біля нижньої опори першого прогону та верхньої опори другого прогону відповідно (точка C).

Рівняння (11) відповідає руху вагона в першому прогоні. Коли розглядається рух вагона в другому прогоні, воно має бути записано у вигляді $T_2^B = T_1^H \exp \mu \varphi$, оскільки при цьому змінюється напрямок переміщення каната.

Для визначення величини натягу несучого каната, а через неї і довжини каната в недеформованому стані використаємо принцип модульного компонування [2], який полягає в поданні окремих випадків навантаження каната системами рівнянь, які далі об'єднуються в загальну математичну модель з умовами зв'язку вигляду (11) і виразами, що враховують наявність та особливості розміщення натяжного пристрою до несучого каната.

Для кожної із задач згідно з положеннями роботи [2] складено по дві математичні моделі, які відповідають переміщенню вагона в першому та другому прогонах.

У разі відсутності натяжного пристрою до несучого каната (кінці закріплені в точках A і B ; див. рис. 1) при переміщенні вагона в першому прогоні математична модель складається з таких рівнянь:

$$H_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1^H} = H_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2^B} \times \exp \left(\mu \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_2^B - \operatorname{tg} \alpha_1^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_2^B \operatorname{tg} \alpha_1^H} \right); \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1^H = \operatorname{tg} \beta_1 - \frac{q_n l_1}{2H_1 \cos \beta_1} (1 + 2k_1 \delta_1); \quad (13)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2^B = \operatorname{tg} \beta_2 + \frac{q_n l_2}{2H_2 \cos \beta_2}; \quad (14)$$

$$L_{\kappa} = \left[\frac{l_1}{\cos \beta_1} + \frac{q_n^2 l_1^3 \cos \beta_1}{24 H_1^2} (1 + 12 \delta_1 (1 - \delta_1) (k_1^2 + k_1)) \right] + \left[\frac{l_2}{\cos \beta_2} + \frac{q_n^2 l_2^3 \cos \beta_2}{24 H_2^2} \right], \quad (15)$$

де H_1 , H_2 – горизонтальні складові натягу несучого каната в першому та другому прогонах відповідно; β_1 , β_2 , l_1 , l_2 – кут нахилу хорди й довжина першого та другого прогонів відповідно; $k_1 = P \cos \beta_1 / q_n l_1$ – коефіцієнт, який враховує вплив ваги вагона P на форму кривої провисання несучого каната; $\delta_1 = x_1 / l_1$ – відносна координата вагона в першому прогоні (x_1 – абсциса вагона в плоскій декартовій системі координат; див. рис. 1, а).

За умови переміщення вагона в другому прогоні математична модель має вигляд

$$H_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2^B} = H_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1^H} \times \exp \left(\mu \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_2^B - \operatorname{tg} \alpha_1^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_2^B \operatorname{tg} \alpha_1^H} \right); \quad (16)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1^H = \operatorname{tg} \beta_1 - \frac{q_n l_1}{2H_1 \cos \beta_1}; \quad (17)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2^B = \operatorname{tg} \beta_2 + \frac{q_n l_2}{2H_2 \cos \beta_2} [1 + 2k_2 (1 - \delta_2)]; \quad (18)$$

$$L_{\kappa} = \left[\frac{l_2}{\cos \beta_2} + \frac{q_n^2 l_2^3 \cos \beta_2}{24 H_2^2} (1 + 12 \delta_2 (1 - \delta_2) (k_2^2 + k_2)) \right] + \left[\frac{l_1}{\cos \beta_1} + \frac{q_n^2 l_1^3 \cos \beta_1}{24 H_1^2} \right], \quad (19)$$

де $k_2 = P \cos \beta_2 / q_n l_2$; $\delta_2 = x_2 / l_2$ (див. рис. 1, б).

У разі розташування натяжного пристрою до несучого каната на нижній станції (таке розташування є звичайним для більшості підвісних канатних доріг) наведені вище математичні моделі зазнають змін лише щодо рівнянь (15) та

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

(19). Замість них слід враховувати умову статичної рівноваги каната в точці B (див. рис. 1), яка матиме такий вигляд:

$$H_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2^H} = G_0 k_0, \quad (20)$$

де k_0 – коефіцієнт, який враховує опори в натяжному пристрої до несучого каната та відповідних відхиляючих елементах (шківки, башмаки тощо).

За умови переміщення вагона в першому прогоні

$$\operatorname{tg} \alpha_2^H = \operatorname{tg} \beta_2 - \frac{q_n l_2}{2H_2 \cos \beta_2}, \quad (21)$$

в іншому разі

$$\operatorname{tg} \alpha_2^H = \operatorname{tg} \beta_2 - \frac{q_n l_2}{2H_2 \cos \beta_2} (1 + 2k_2 \delta_2). \quad (22)$$

З формул (15) та (19) видно, що довжина каната в нерозтягнутому стані, яка надалі підлягає уточненню з урахуванням пружних і температурних деформацій, залежить не стільки від зусилля в канаті, як від горизонтальної складової цієї величини, тому аналіз впливу деформацій на навантаженість як несучого, так і тягового каната здійснюємо саме за параметром H . Доцільність такого підходу підтверджується й виразом (2), згідно з яким кут підйому вагона залежить від величини H .

За наведеним вище алгоритмом визначаємо горизонтальну складову зусилля в несучому канаті з урахуванням пружних деформацій $H_{\text{пр}}$, після чого розраховуємо відхилення цієї

величини від такої для недеформованого стану каната за формулою

$$\Delta H = \frac{|H_{\text{пр}} - H|}{H} 100\%. \quad (23)$$

Результати

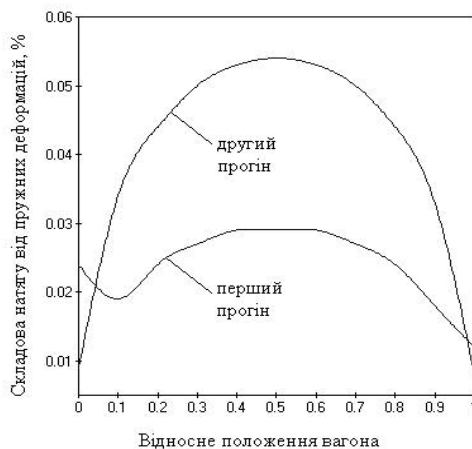
Аналіз отриманих результатів показав, що ряди послідовно визначених величин горизонтальної складової натягу збігаються в четвертому наближенні (деякі й раніше) з точністю $\xi \leq 0,1\%$.

В останньому наближенні відхилення ΔH вважаємо складовою натягу несучого каната від пружних деформацій.

Графіки зміни відхилення ΔH під час переміщення вагона в першому та другому прогонах за наявності натяжного пристрою до несучого каната і без нього наведено на рис. 2, 3.

Результати аналізу отриманих даних вказано в табл. 1, де прийнято такі позначення: ΔH_1 , ΔH_2 – складова натягу несучого каната від пружних деформацій у першому та другому прогонах відповідно; ΔT_r – відхилення зусилля в тяговому канаті, визначеного з урахуванням зміни кута підйому вагона через пружну деформацію несучого каната в четвертому наближенні, від такого для несучого каната в недеформованому стані; «Без НП» – кінці несучого каната закріплені в точках A і B (див. рис. 1) без використання натяжного пристрою (НП); «НП-низ» – використання натяжного пристрою несучого каната з його розміщенням на нижній станції (точка B ; див. рис. 1).

a



б

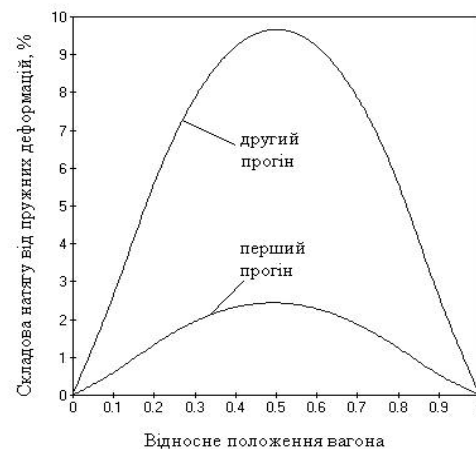


Рис. 2. Вплив пружних деформацій на навантаженість несучого каната без НП:

a – прогони з вагоном; *б* – прогони без вагона

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

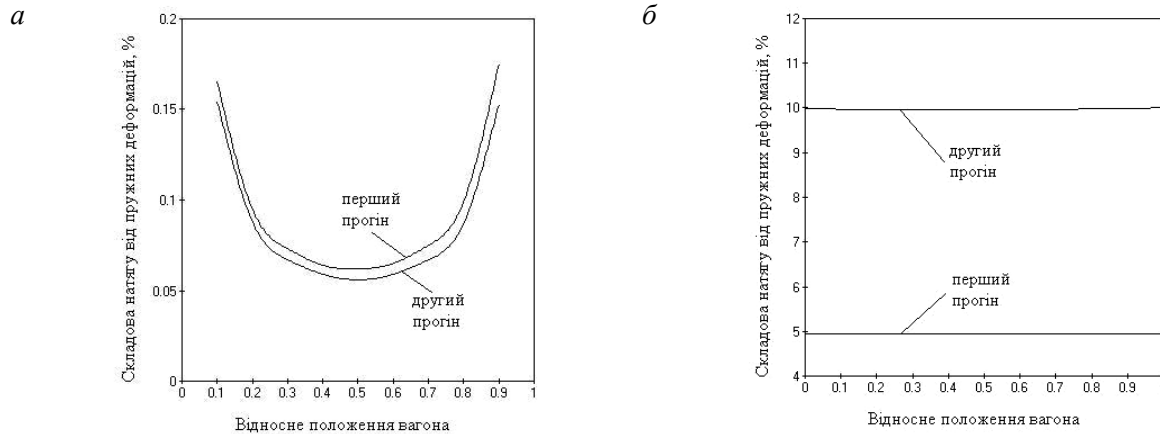


Рис. 3. Вплив пружних деформацій на навантаженість несучого каната з НП-низ:

а – прогони з вагоном; б – прогони без вагона

Таблиця 1

Значення показників впливу пружних деформацій на зусилля в несучому і тяговому канатах, %

| Показник | Без НП | | НП-низ | |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | перший прогін | другий прогін | перший прогін | другий прогін |
| ΔH_1 | 0,029 | 9,668 | 0,175 | 10,005 |
| ΔH_2 | 2,441 | 0,054 | 0,933 | 0,154 |
| ΔT_T | 0,009 | 0,005 | 0,565 | 0,305 |

Наукова новизна та практична значимість

Доведена можливість не враховувати зміни довжини несучого каната через пружні властивості під час моделювання навантаженості елементів контуру «привод – тяговий канат – натяжний пристрій».

Використання наведених методик та отриманих результатів дозволить спростити математичні моделі навантаженості елементів канатної системи підвісної дороги та системи «привод – тяговий канат – натяжний пристрій» в цілому.

Висновки

1. З табл. 1 видно, що вплив пружних деформацій несучого каната на зусилля в тяговому канаті є незначним (менше 1 %), що вказує на можливість не враховувати зміни довжини несучого каната через пружні властивості під час моделювання навантаженості елементів контуру «привод – тяговий канат – натяжний пристрій».

2. Наявність натяжного пристрою підвищує вплив пружних властивостей несучого каната на елементи канатної системи та систему в цілому. Однак з рис. 3, б видно, що в прогонах за відсутності вагона величина ΔH майже не змінюється. Це вказує на те, що вона не залежить від положення вагона в суміжному прогоні, а визначається лише параметрами канатної системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беркман, М. Б. Подвесные канатные дороги / М. Б. Беркман. – М. : Машиностроение, 1984. – 264 с.
2. Горячев, Ю. К. Применение принципа модульной компоновки к математическому моделированию нагруженности несущего каната маятниковой подвесной дороги / Ю. К. Горячев, А. С. Куропятник // Зб. наук. пр. ПолтНТУ. Серія «Галузеве машинобудування, буд-во». – 2010. – № 2 (27). – С. 205–214.
3. Патара, Д. И. Расчет и проектирование канатных систем на примере подвесных дорог / Д. И. Патара. – Тбилиси : Мецниерба, 1991. – 103 с.
4. Построение диаграмм окружных усилий привода маятниковой подвесной канатной дороги / Ю. К. Горячев, Л. Г. Сванидзе, А. С. Куропятник и др. // Подъемно-транспортная техника. – 2010. – № 4. – С. 56–63.
5. Правила устройства и безопасной эксплуатации пассажирских подвесных канатных дорог (ППКД): Утв.: Госгортехнадзор СССР 28.05.74 / Госгортехнадзор СССР. – М. : Металлургия, 1975. – 56 с.
6. Результаты исследований динамических процессов системы управления асинхронного час-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

- тотного электропривода маятниковых подвесных канатных дорог с промежуточными опорами / Б. М. Чунашвили, М. И. Кобалия, А. М. Петросян и др. // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2012. – № 3 (19). – С. 452–453.
7. Сологуб, Б. В. Аналіз конструктивних особливостей та основи синтезу пасажирських доріг з тягово-несним канатом / Б. В. Сологуб // *Наук. вісн. Херсон. держ. морської акад.* – 2012. – № 2 (7). – С. 206–216.
 8. Чунашвили, Б. М. Диаграмма нагрузки электроприводов маятниковых подвесных канатных дорог / Б. М. Чунашвили, М. И. Кобалия // *Вестн. Нац. технического ун-та «ХПИ»*. – 2002. – № 12. – С. 85–86.
 9. Knawa, M. Effects of dynamic loads acting on carrying cable in operating ropeway / M. Knawa, D. Bryja // *Proc. in Applied Mathematics and Mechanics*. – 2008. – Vol. 8, iss. 1. – P. 10297–10298.
 10. Kopanakis, G. A. Oscillations in ropeways / G. A. Kopanakis // *Part 1. Intern. Ropeway Review*. – 2011. – № 6. – P. 48–50.
 11. Kopanakis, G. A. Oscillations in ropeways / G. A. Kopanakis // *Part 2, 3. Intern. Ropeway Review*. – 2012. – № 1. – P. 46–49.
 12. Kopanakis, G. A. Oscillations in ropeways / G. A. Kopanakis // *Part 4. Intern. Ropeway Review*. – 2012. – № 3. – P. 63–66.
 13. Nejez, J. Cableway oscillation problems / J. Nejez // *Intern. Ropeway Review*. – 2011. – № 6. – P. 47.

С. В. РАКША¹, Ю. К. ГОРЯЧЕВ², А. С. КУРОП'ЯТНИК^{3*}

¹Каф. «Прикладная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, эл. почта raksha@ukr.net

²Каф. «Прикладная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18

^{3*}Каф. «Прикладная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, эл. почта kuropyatnick@gmail.com

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ НЕСУЩЕГО КАНАТА НА УСИЛИЯ В ТЯГОВОМ КАНАТЕ ПОДВЕСНОЙ ДОРОГИ

Цель. Оценка влияния упругих деформаций несущего каната, возникающих при движении вагонов, на усилие в тяговом канате подвесной дороги. **Методика.** Для исследования влияния упругих деформаций несущего каната на усилие в тяговом канате использовался метод последовательных приближений. При этом определение натяжения несущего каната осуществлялось с использованием методики, основанной на принципах модульной компоновки, суть которой состоит в формировании математической модели путем сочетания блоков формул, описывающих равновесие несущего каната на опорах. **Результаты.** Анализ полученных результатов показал, что ряды последовательно определенных величин горизонтальной составляющей натяжения несущего каната сходятся в четвертом приближении (некоторые и раньше) с точностью 0,1 %. Это указывает на возможность не учитывать изменение длины несущего каната, обусловленное его упругими свойствами, при моделировании нагруженности элементов системы «привод – тяговый канат – натяжное устройство». Также установлено, что использование натяжного устройства увеличивает влияние упругих свойств несущего каната на элементы канатной системы и системы «привод – тяговый канат – натяжное устройство» в целом. При этом упругая составляющая натяжения несущего каната в исследуемом пролете не зависит от положения вагона в смежном пролете, а определяется только параметрами канатной системы. **Научная новизна.** Доказана возможность не учитывать изменения длины несущего каната, обусловленные его упругими свойствами, при моделировании нагруженности элементов контура «привод – тяговый канат – натяжное устройство». **Практическая значимость.** Использование представленных методик и полученных результатов позволит упростить математические модели нагруженности элементов канатной системы подвесной дороги и системы «привод – тяговый канат – натяжное устройство» в целом.

Ключевые слова: подвесные канатные дороги; канатная система; несущий канат; тяговый канат; напряженно-деформированное состояние

S. V. RAKSHA¹, YU. K. GORYACHEV², A. S. KUROPYATNIK^{3*}¹Dep. «Applied Mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail raksha@ukr.net²Dep. «Applied Mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18^{3*}Dep. «Applied Mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail kuropyatnick@gmail.com

INFLUENCE ANALYSIS OF ELASTIC DEFORMATIONS OF THE TRACK CABLE ON EFFORTS IN THE HAULING ROPE OF AERIAL ROPEWAY

Purpose. To estimate influence of elastic deformations of the track cable arising at movement of cars, on effort in a hauling rope of the aerial ropeway. **Methodology.** The method of consecutive approaches was used for research influence of elastic deformations of a track cable on effort in a hauling rope. Thus, definition of a tension of a track cable was carried out with use of the technique based on principles of modular configuration, the essence of which consists in formation of mathematical model by a combination of blocks of the formulas describing balance of the track cable on supports. **Findings.** The research has shown that influence of elastic deformations of a track cable on effort in a hauling rope was insignificant (less than 1 %). That points to possibility not to consider change of the track cable length, caused by its elastic properties, when modeling loading of elements of system «drive – traction rope – tension device». Also it has been found that use of the tension device of a track cable increased influence of its elastic properties on loading of rope system elements. At the same time the elastic component of the track cable tension in the test flight does not depend on a car position in the adjacent span, but only determines by the parameters of the rope system. **Originality.** The possibility of excluding the changes of track cable length caused by its elastic properties, when modeling loading of elements of system «drive – traction rope – tension device» was proved. **Practical value.** The use of these techniques and the results will simplify the mathematical model of loading of elements of the cable system and the system «drive – traction rope – tension device» as a whole.

Keywords: ropeway; rope system; track cable; hauling rope; stress-strain state

REFERENCES

1. Berkman M.B. *Podvesnyye kanatnyye dorogi* [Aerial cableways]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1984. 264 p.
2. Goryachev Yu.K., Kuropyatnik A.S. Primeneniye printsipa modulnoy komponovki k matematicheskomu modelirovaniyu nagruzhennosti nesushchego kanata mayatnikovoy podvesnoy dorogi [Application of a principle of modular configuration to mathematical modeling of loading of a track cable of the aerial ropeway]. *Zbirnyk naukovykh prats PolNTU. Seriya «Haluzeve mashynobudivannia, budivnytstvo» – Bulletin of Poltava National Technical University. Series «Branch engineering, construction»*, 2010, no. 2 (27), pp. 205-214.
3. Pataraya D.I. *Raschet i proyektirovaniye kanatnykh sistem na primere podvesnykh dorog* [Calculation and design of rope systems on an example of aerial ropeway]. Tbilisi, Metsniyerba Publ., 1991. 103 p.
4. Goryachev Yu.K., Svanidze L.G., Kuropyatnik A.S., Suprunov V.F. Postroyeniye diagramm okruzhnykh usiliiy privoda mayatnikovoy podvesnoy kanatnoy dorogi [Creation of charts of district efforts of a drive of a reversible aerial ropeway]. *Podyemno-transportnaya tekhnika – Handling Equipment*, 2010, no. 4, pp. 56-63.
5. *Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii passazhirskikh podvesnykh kanatnykh dorog* [Rules for the construction and safe operation of passenger aerial ropeways]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 56 p.
6. Chunashvili B.M., Kobaliya M.I., Petrosyan A.M., Tsereteli K.O. Rezultaty issledovaniy dinamicheskikh protsessov sistemy upravleniya asinkhronnogo chastotnogo elektroprivoda mayatnikovoykh podvesnykh kanatnykh dorog s promezhutochnymi oporami [Results of the research of dynamic processes in the control system of asynchronous frequency electric drive of hanging pendulum ropeways with intermediate bearings]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electrical and energy saving systems*, 2012, no. 3 (19), pp. 452-453.
7. Sologub B.V. Analiz konstruktyvnykh osoblyvostey ta osnovy syntezu pasazhyrskykh dorih z tiahovo-nesnym kanatom [The analysis of constructional features and a basis of synthesis of passenger roads with a traction-bearing rope]. *Naukovi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii – Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, 2012, no. 2 (7), pp. 206-216.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

8. Chunashvili B.M., Kobaliya M.I. Diagramma nagruzki elektroprivodov mayatnikovoykh podvesnykh kanatnykh dorog [Load diagram of electric pendulum ropeways]. *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta «KhPI» – Bulletin of the National Technical University «KhPI»*, 2010, no. 28, pp. 428-429.
9. Knawa M., Bryja D. Effects of dynamic loads acting on carrying cable in operating ropeway. *Proc. in Applied Mathematics and Mechanics*, 2008, vol. 8, issue 1, pp. 10297-10298.
10. Kopanakis G.A. Oscillations in ropeways. Part 1. *International Ropeway Review*, 2011, no. 6, pp. 48-50.
11. Kopanakis G.A. Oscillations in ropeways. Part 2, 3. *International Ropeway Review*, 2012, no. 1, pp. 46-49.
12. Kopanakis G.A. Oscillations in ropeways. Part 4. *International Ropeway Review*, 2012, no. 3, pp. 63-66.
13. Nejez J. Cableway oscillation problems. *International Ropeway Review*, 2011, no. 6, p. 47.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. О. Заблудовським (Україна); д.т.н., проф. К. С. Заболотним (Україна)

Надійшла до редколегії 16.09.2013

Прийнята до друку 29.10.2013