

УДК 625.571

Горячев Ю. К., Куроп'ятник О. С.

**ДО ПИТАННЯ ПРО РАЦІОНАЛЬНЕ РОЗМІЩЕННЯ ОПОР ПІДВІСНОЇ
КАНАТНОЇ ДОРОГИ МАЯТНИКОВОГО ТИПУ**

Одним із недоліків підвісних канатних доріг маятникового типу є безпосередня залежність продуктивності (для вантажних доріг) або пропускної здатності (для пасажирських доріг) від довжини дороги (шляху транспортування). Зі збільшенням довжини дороги суттєво збільшується цикл транспортування – різниця в часі між двома послідовними завантаженнями (розвантаженнями) вагонів. У дорогах кільцевого типу величина шляху транспортування замінюється кроком навішування вагонів, який (а отже, і продуктивність) не залежить від довжини дороги.

Величина пропускної здатності особливо важлива для доріг, введених в експлуатацію десятки років тому, які є одним з основних видів транспорту в місці їх розташування. Прикладом такої є пасажирська підвісна канатна дорога маятникового типу «Місхор – Ай-Петрі», основною задачею якої є перевезення туристів та місцевих мешканців від підніжжя до вершини гори з мінімальними затратами часу за рахунок прямолінійності профілю траси в плані. Оскільки кількість пасажирів щороку збільшується, виникла необхідність підвищення пропускної здатності дороги.

Пропускна здатність підвісної канатної дороги маятникового типу може бути визначено за формулою:

$$P = \frac{N}{t_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

де N – місткість вагонів;

$t_{\text{ц}}$ – тривалість циклу транспортування.

З формули (1) видно, що є лише два шляхи підвищення пропускної здатності дороги:

- збільшення місткості вагонів;
- зменшення тривалості циклу транспортування.

Зі збільшенням місткості вагонів підвищується навантаження на канати, а отже, й на інші елементи конструкції дороги (деталі й вузли приводу, опор тощо). Окрім цього, такий варіант є нераціональним при виконанні модернізації дороги, оскільки необхідно забезпечити мінімальність витрат на переобладнання та обмежити втручання в базову конструкцію.

Тривалість циклу транспортування, на відміну від вказаної в роботі [1], можна визначити за спрощеною формулою:

$$t_{\text{ц}} = it_{\text{п}} + t_{\text{у}} + it_{\text{з}}, \quad (2)$$

де $t_{\text{п}}$, $t_{\text{з}}$ – тривалість пуску та зупинки руху вагонів відповідно;

$t_{\text{у}}$ – тривалість усталеного руху вагонів (руху з постійною швидкістю, бажано, наближеною до максимального проектного значення);

i – кількість циклів перехідних режимів руху (пуск, зупинка).

Величина $t_{\text{у}}$ залежить від довжини дороги. Її частка в тривалості циклу транспортування має бути найбільшою, оскільки в цей період рух здійснюється на максимально можливій (згідно проекту дороги) швидкості. Значення $t_{\text{п}}$ і $t_{\text{з}}$ залежать від максимальної швидкості

та прискорення руху і не підлягають зменшенню (через обмеження щодо безпечної експлуатації дороги). Отже, кількість циклів перехідних режимів руху може бути критерієм поліпшення проектних та експлуатаційних характеристик дороги.

Як відомо [2], в підвісних канатних дорогах маятникового типу кількість циклів перехідних режимів руху залежить від кількості опор. При підходженні до опори необхідно зменшити швидкість руху вагона; уздовж опорного башмака вагон переміщується зі зменшеною швидкістю (для попередження розгойдування вагона, його удари о конструкції та сходу з опори); після цього вагон розганяється до максимальної проектної швидкості. Отже, зменшення кількості опор та розміщення їх таким чином, щоб вагони проходили їх одночасно, дозволить скоротити кількість циклів перехідних режимів руху і, відповідно, підвищити продуктивність дороги навіть за умови незмінної місткості вагонів [2].

У роботі [2] спеціалістами організації, яка здійснює експлуатацію та обслуговування вказаної дороги, було запропоновано змінити положення опор для забезпечення можливості проходження їх вагонами одночасно. Однак наведені дані дозволяють лише орієнтовно оцінити економічну доцільність застосування такого підходу, технічний бік питання майже не розглянуто.

Метою даної роботи є оцінка впливу зміни положення опор на трасі за запропонованим у роботі [2] принципом на навантаженість елементів приводу та надання рекомендацій щодо особливостей застосування наведеного підходу до модернізації підвісних канатних доріг маятникового типу.

Розглянемо застосування наведеного принципу на прикладі пасажирської підвісної канатної дороги маятникового типу «Місхор – Ай-Петрі» (нижня ділянка) з такими параметрами:

- профіль дороги – згідно рис. 1;
- корисне навантаження $P_K = 32$ кН (40 пасажирів по 80 кг);
- вага порожнього вагона $P_0 = 18$ кН;
- погонна вага несучого каната $q_H = 0,1263$ кН/м (канат закритий несучий діаметром 47 мм за ГОСТ 7675-73);
- погонна вага тягового каната $q_T = 0,01635$ кН/м (канат подвійного звивання діаметром 21 мм за ГОСТ 2688-80);
- робоче зусилля натяжного пристрою, яке сприймається однією віткою тягового каната, $T_0 = 56,5/2$ кН (маса противаги 5,65 т);
- довжина несучого каната на трасі $L_K = 1342$ м (визначено згідно рекомендацій [3], вважаючи провисання каната в прогонах приблизно однаковим і рівним 0,2 за умови відсутності натяжного пристрою).

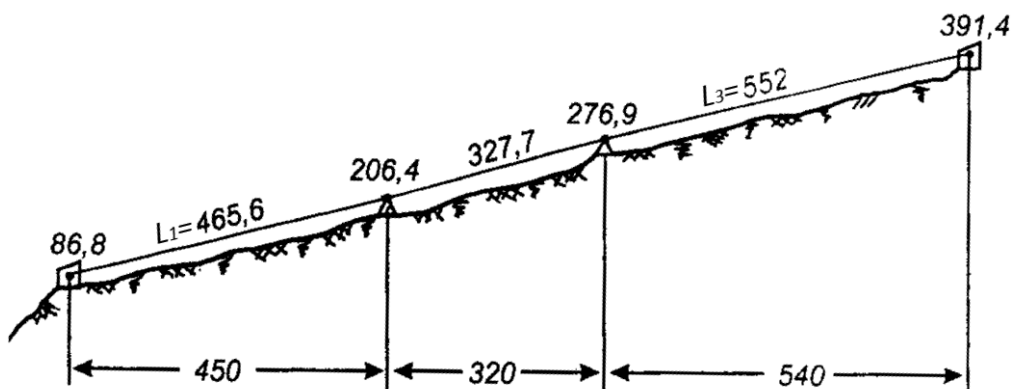


Рис. 1. Профіль дороги

З матеріалів роботи [2] видно, що при розміщенні опор за схемою, вказаною на рис. 1, під час переміщення вагона між станціями мають місце додаткові цикли перехідних режимів руху (рис. 2), що збільшує тривалість циклу транспортування в цілому. Цього можна уникнути, якщо розмістити опори таким чином, щоб шляхи транспортування L_1 та L_3 були рівними.

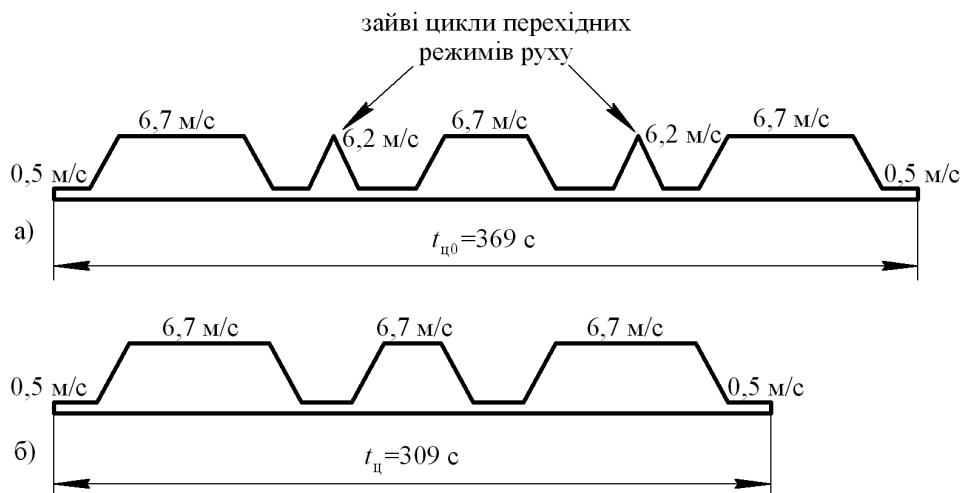


Рис. 2. Діаграми швидкостей руху вагонів:

а – вихідний профіль; б – профіль зі зміщеними опорами (модернізований)

За формулою (1) пропускна здатність дороги з вихідним профілем (Π_0) та після модернізації (Π):

$$\Pi_0 = \frac{N}{t_{ц0}}; \quad \Pi = \frac{N}{t_{ц}}, \quad (3)$$

де $t_{ц0} = 369$ с; $t_{ц} = 309$ с – тривалість циклу транспортування до та після модернізації (див. рис. 2).

Лишаючи незмінною місткість вагонів, визначимо відносну величину збільшення пропускної здатності:

$$\Delta \Pi = \left(\frac{t_{ц0}}{t_{ц}} - 1 \right) \cdot 100\% = \left(\frac{369}{309} - 1 \right) \cdot 100\% = 19,4\%. \quad (4)$$

З формули (4) видно, що при розміщенні опор за вказаним вище принципом пропускна здатність дороги збільшується майже на 20 %, що, безперечно, підкреслює доцільність проведення запропонованої модернізації.

Теоретичні та експериментальні дослідження показали [4], що величина окружного зусилля приводу значною мірою залежить від розміщення опор уздовж траси, тому й постає необхідність оцінити вплив запропонованої модернізації на навантаженість елементів приводу.

З діаграм, наведених в роботі [5], випливає, що при розміщенні опор дороги «Місхор – Ай-Петрі» за запропонованою вище схемою зміна пікових (максимальних і мінімальних) значень окружного зусилля перебуває в межах 10 %, що може вважатися допустимим, враховуючи нормативний запас міцності та прогнозований економічний ефект модернізації. Однак зміна амплітуди коливань (різниці значень піків виплеску величини окружного зусилля) перевищує 30 % у бік збільшення для приводу модернізованої дороги, що, безумовно, негативно відіб'ється на навантаженості елементів приводу за умов динамічних навантажень, які супроводжують процеси розгону та зупинки під час проходження вагонами опор.

Відомо [6], що форма кривої провисання несучого каната значною мірою визначається горизонтальною складовою його натягу. Для стабілізації цієї величини введемо в конструкцію дороги натяжний пристрій до несучого каната, який, окрім зазначеного ефекту, буде компенсувати температурне та пружне видовження каната впродовж експлуатації.

З метою зменшення робочого зусилля натяжний пристрій розміщуємо на нижній станції.

Зважаючи на те, що навантаженість тягового каната (а отже, й елементів приводу) залежить від кута підйому вагона, який визначається кривою провисання несучого каната та змінюється під час руху вагона [6], математичну модель змінності натягу тягового каната складаємо з урахуванням особливостей формування кривої провисання несучого каната з використанням принципів модульного компонування [7].

Оскільки досліджувана дорога має три прогони, необхідно скласти три математичні моделі, які описують процес формування (зі змінністю в часі) кривої провисання несучого каната під час руху вагона у відповідних прогонах. При цьому структуру математичних моделей (кількість модулів певного типу згідно роботи [7]) може бути подано у вигляді табл. 1.

Таблиця 1

Структура математичних моделей

№ модуля	1	2	3	4	5	6	7	8
$j=1$	–	1	1	–	–	–	–	1
$j=2$	–	–	–	1	–	–	–	1
$j=3$	1	–	–	–	1	–	–	1

Примітка. Літерою j позначено номер прогону, в якому переміщується вагон.

При переміщенні вагона в першому прогоні згідно табл. 1 математична модель має вигляд:

$$H_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 a_1^H} = H_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 a_2^B} \exp \left(\operatorname{marctg} \frac{\operatorname{tg} a_2^B - \operatorname{tg} a_1^H}{1 + \operatorname{tg} a_2^B \operatorname{tg} a_1^H} \right);$$

$$\operatorname{tg} a_1^H = \operatorname{tg} b_1 - \frac{q_H l_1}{2H_1 \cos b_1} (1 + 2k_1 d_1); \quad \operatorname{tg} a_2^B = \operatorname{tg} b_2 + \frac{q_H l_2}{2H_2 \cos b_2}; \quad k_1 = \frac{P}{q_H l_1} \cos b_1;$$

$$H_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 a_2^H} = H_3 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 a_3^B} \exp \left(\operatorname{marctg} \frac{\operatorname{tg} a_3^B - \operatorname{tg} a_2^H}{1 + \operatorname{tg} a_3^B \operatorname{tg} a_2^H} \right);$$

$$\operatorname{tg} a_2^H = \operatorname{tg} b_2 - \frac{q_H l_2}{2H_2 \cos b_2}; \quad \operatorname{tg} a_3^B = \operatorname{tg} b_3 + \frac{q_H l_3}{2H_3 \cos b_3};$$

$$H_3 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 a_3^H} = G_0 k_0; \quad \operatorname{tg} a_3^H = \operatorname{tg} b_3 - \frac{q_H l_3}{2H_3 \cos b_3},$$

де H_i – горизонтальна складова натягу несучого каната в i -ому прогоні;

a_i^B, a_i^H – кути нахилу дотичних до кривої провисання несучого каната в i -ому прогоні біля верхньої та нижньої опорних точок відповідно;

b_i, l_i – кут нахилу хорди та довжина i -ого прогону;

k_i – коефіцієнт додаткового навантаження при переміщенні вагона в i -ому прогоні;

P – величина зосередженої сили, яка в різних випадках моделювання дорівнює $(P_K + P_0)$ або P_0 ;

m – коефіцієнт тертя в парі «несучий канат – опорний башмак»;

$d_i = x_i / l_i$ – відносна координата, яка вказує положення вагона в i -ому прогоні (де x_i – відповідна абсциса положення);

G_0 – величина робочого зусилля натяжного пристрою до несучого каната;

k_0 – коефіцієнт, який враховує опори руху елементів натяжного пристрою до несучого каната.

Математичні моделі, які описують процес формування кривої провисання несучого каната під час руху вагона у другому та третьому прогонах, складаються аналогічним чином з дотриманням відповідної структури (див. табл. 1).

Реалізація моделей за допомогою програми MathCAD при різних значеннях d_i дозволяє визначити горизонтальну складову натягу несучого каната H_i під час руху вагона в i -ому прогоні. За цими значеннями встановлюємо кут підйому g в різних положеннях вагона згідно рівняння:

$$\operatorname{tg} g = \operatorname{tg} b + \frac{P \cos b + (q_n + q_t)l}{2H \cos b} (1 - 2d). \quad (5)$$

Окружне зусилля приводу U може бути визначено як різниця натягів набігаючої на приводний шків та збігаючої з нього віток тягового каната ($T_{нб}$ і $T_{зб}$ відповідно). При цьому величини натягів визначаються за формулами [4]:

$$T_{нб} = P_n C_p \cos g_n + P_n \sin g_n + W_n; \quad (6)$$

$$T_{зб} = -P_b C_p \cos g_b + P_b \sin g_b + W_b, \quad (7)$$

де P_n , P_b – складові ваги верхнього та нижнього вагонів відповідно, які сприймаються одним тяговим канатом (нагадаємо, що в досліджуваній дорозі два тягових канати; під нижнім слід розуміти вагон, який рухається від нижньої до верхньої станції, верхній вагон – у зворотному напрямку);

g_n , g_b – кути підйому нижнього та верхнього вагонів відповідно;

W_n , W_b – складові натягу віток тягового каната від власної ваги з боку нижнього та верхнього вагонів відповідно;

C_p – коефіцієнт опору руху вагона.

Для визначення максимального натягу віток тягового каната, а отже, й найбільшого значення окружного зусилля приводу, необхідно розглянути два випадки навантаження:

1) нижній вагон повністю завантажений, а верхній – порожній; при цьому величина $T_{зб}$ буде найменшою, а $T_{нб}$ – найбільшою, що дає змогу визначити максимальне окружне зусилля при роботі приводу в силовому режимі (надання руху вагонам за рахунок електродвигуна);

2) верхній вагон повністю завантажений, а нижній – порожній; при цьому величина $T_{нб}$ буде найменшою, а $T_{зб}$ – найбільшою, що дає змогу визначити максимальне окружне зусилля при роботі приводу в гальмівному режимі (стримування руху вагонів за рахунок електродвигуна).

У першому випадку величини P_n і P_b , які входять до формул (6) та (7), визначаються таким чином:

$$P_n = 0,5(P_k + P_0); \quad P_b = 0,5P_0. \quad (8)$$

Для другого випадку вирази (8) змінюються на протилежні:

$$P_H = 0,5P_0; \quad P_B = 0,5(P_K + P_0). \quad (9)$$

У формулах (8) та (9) величини P_K і P_0 – корисне навантаження та власна вага вагона, вказані в технічній характеристиці дороги.

Слід зауважити, що в модульні математичні моделі й у вираз (5) замість величини P слід підставляти фактичне робоче навантаження (зосереджену силу), яке формує криву провисання несучого каната, а саме:

- під час руху вагона уверх $P = 2P_B$;
- під час руху вагона вниз $P = 2P_H$.

Така особливість моделювання пояснюється наявністю двох тягових канатів і відповідним розподіленням робочого навантаження.

Кути підйому нижнього та верхнього вагонів можна визначити за формулами, отриманими на основі виразу (5) з урахуванням вище зазначеного:

$$\operatorname{tg} g_H = \operatorname{tg} b + \frac{2P_H \cos b + (q_H + q_T)l}{2H \cos b} (1 - 2d_H); \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} g_B = \operatorname{tg} b + \frac{2P_B \cos b + (q_H + q_T)l}{2H \cos b} (1 - 2d_B). \quad (11)$$

Складові натягу віток тягового каната від власної ваги з боку нижнього і верхнього вагонів можна визначити за формулами:

$$W_H = T_0 + q_T(h_c + fl_c); \quad (12)$$

$$W_B = T_0 - q_T(h_c + fl_c), \quad (13)$$

де h_c – різниця висот опорних точок несучого каната, розміщених на станціях;

l_c – довжина горизонтальної проекції дороги;

f – коефіцієнт опору руху тягового каната.

Виконавши розрахунок за наведеною методикою з використанням програми MathCAD при дискретизації переміщення вагона кроком 20 м, отримуємо значення окружного зусилля приводу (рис. 3).

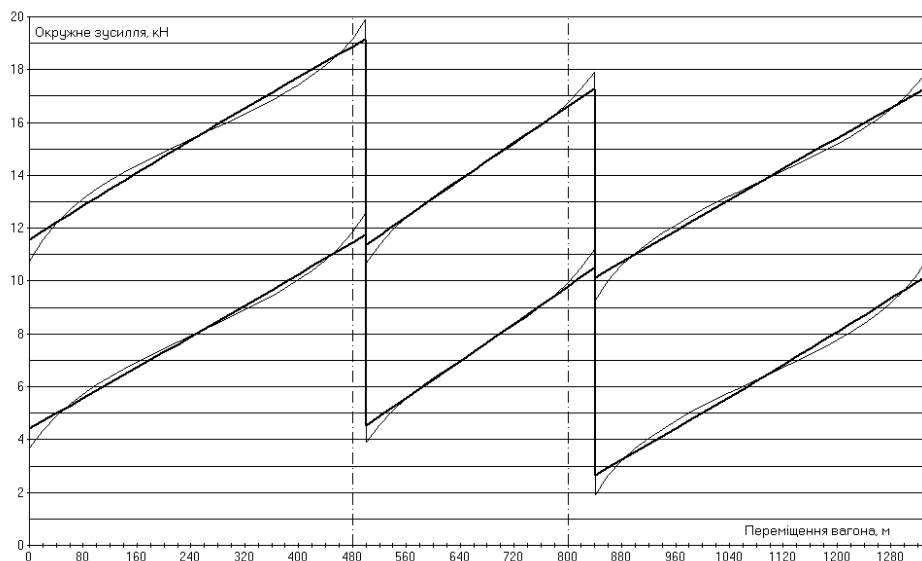


Рис. 3. Діаграми окружних зусиль приводу

На рис. 3 наведено дві пари графіків, на яких тонкими лініями вказані діаграми окружних зусиль приводу без використання натяжного пристрою до несучого каната, а товстими – з використанням такого (обидва випадки – після зміщення опор). Верхня пара графіків відповідає випадку, коли нижній вагон повністю завантажено, а верхній – порожній; нижня пара – для випадку, коли верхній вагон повністю завантажено, а нижній – порожній. Оскільки гальмівних режимів при роботі дороги немає (окружне зусилля більше нуля для всіх положень вагона), проектний розрахунок щодо вибору елементів приводу слід виконувати за верхньою парою графіків. Однак під час проведення досліджень динамічної навантаженості елементів приводу необхідно розглядати обидва випадки, враховуючи амплітуди місцевої зміни значень окружного зусилля.

Оцінку впливу запропонованої модернізації на навантаженість елементів приводу здійснюємо за величинами амплітуд місцевої зміни значень окружного зусилля (табл. 2).

Таблиця 2

Результати аналізу діаграм окружних зусиль (за рис. 3)

Напрямок	№ опори	Амплітуда, кН		Зменшення амплітуди, %
		Без натяжного пристрою	З натяжним пристроєм	
Вверх	1	$19,889 - 10,678 = 9,211$	$19,156 - 11,366 = 7,79$	15
	2	$17,916 - 9,296 = 8,62$	$17,292 - 10,129 = 7,163$	17
Вниз	1	$12,569 - 3,916 = 8,653$	$11,735 - 4,546 = 7,189$	17
	2	$11,192 - 1,918 = 9,274$	$10,503 - 2,659 = 7,844$	15

Результати аналізу діаграм свідчать про доцільність використання натяжного пристрою до несучого каната, оскільки це зменшує навантаженість елементів приводу на 17 %, що є суттєвим, зважаючи на наявність перехідних режимів руху вагонів біля опор.

Відомо [5], що розміщення опор за запропованою схемою збільшує амплітуду місцевої зміни окружного зусилля на 30 % у порівнянні з фактичним профілем. Оцінимо вплив вказаної вище модернізації (зміщення опор з використанням натяжного пристрою до несучого каната) на амплітуду місцевої зміни окружного зусилля у порівнянні з фактичним профілем. Результати зведемо в табл. 3 та подамо в графічному вигляді (рис. 4).

З табл. 3 видно, що при зміщенні опор за вказаним вище принципом з використанням натяжного пристрою до несучого каната збільшення амплітуди місцевої зміни окружного зусилля складає лише 8,5 % (без натяжного пристрою – 30 %).

Таблиця 3

Результати аналізу впливу модернізації на навантаженість елементів приводу (за рис. 4)

Напрямок	№ опори	Амплітуда, кН		Збільшення амплітуди, %
		Фактичний профіль	Модернізований профіль з натяжним пристроєм	
Вверх	1	$19,486 - 12,253 = 7,233$	$19,156 - 11,366 = 7,79$	7,7
	2	$17,449 - 10,846 = 6,603$	$17,292 - 10,129 = 7,163$	8,5
Вниз	1	$10,977 - 4,322 = 6,655$	$11,735 - 4,546 = 7,189$	8,0
	2	$9,568 - 2,261 = 7,307$	$10,503 - 2,659 = 7,844$	7,3

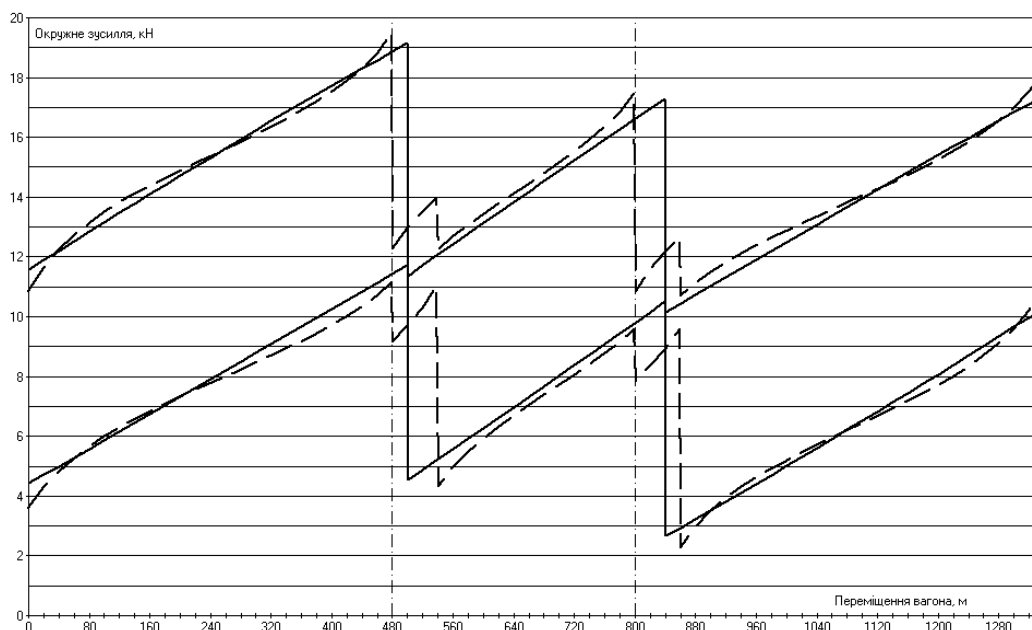


Рис. 4. Діаграми окружних зусиль приводу (до табл. 3)

ВИСНОВКИ

Враховуючи позитивний ефект (збільшення пропускної здатності дороги майже на 20 % – згідно формули (4)), робимо висновок про доцільність проведення модернізації пасажирської підвісної канатної дороги «Місхор – Ай-Петрі» в такому обсязі:

- зміна профілю дороги шляхом зміщення опор таким чином, щоб довжини несучого каната в першому та третьому прогонах були однаковими;
- використання натяжного пристрою до несучого каната з його розміщенням на нижній станції.

Узагальнюючи результати проведених досліджень, відмічаємо доцільність проведення комплексного техніко-економічного аналізу впливу зміни профілю на показники працездатності та економічної ефективності під час підготовки плану модернізації підвісної канатної дороги. Разом із тим, зважаючи на складність і трудомісткість таких операцій, відмічаємо актуальність задач формування рекомендацій щодо раціонального профілювання підвісних канатних доріг маятникового типу з урахуванням зазначених вище підходів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тисовський Л. О. Дослідження закономірностей руху вантажу вздовж канатної транспортної установки / Л. О. Тисовський, І. М. Рудько // Підйомно-транспортна техніка. – 2005. – № 4. – С. 12–18.
2. Сванидзе Л. Г. Размещение опор маятниковой канатной дороги / Л. Г. Сванидзе, В. Ф. Супрунов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2009. – № 4.
3. Wire rope engineering handbook. US Steel Supply. – 82 p.
4. Горячев Ю. К. Построение диаграмм окружных усилий привода маятниковой подвесной канатной дороги / Ю. К. Горячев, Л. Г. Сванидзе, А. С. Куропятник, В. Ф. Супрунов // Подъемно-транспортная техника. – 2010. – № 4. – С. 56–63.
5. Горячев Ю. К. Улучшение профиля маятниковой подвесной канатной дороги / Ю. К. Горячев, А. С. Куропятник // Збірник праць ДЕГУТ. – 2011.
6. Беркман М. Б. Подвесные канатные дороги / М. Б. Беркман [и др.]. – М. : Машиностроение, 1984. – 264 с.
7. Горячев Ю. К. Применение принципа модульной компоновки к математическому моделированию нагруженности несущего каната маятниковой подвесной дороги / Ю. К. Горячев, А. С. Куропятник // Збірник наукових праць ПолтНТУ. – Полтава. – 2010. – № 2 (27). – С. 205–214. – (Серія «Галузеве машинобудування, будівництво»).