

УДК 625.574

МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ ПРИВОДУ КАНАТНОЇ ДОРОГИ З УРАХУВАННЯМ ЗМІЩЕННЯ НЕСУЧОГО КАНАТА НА ОПОРАХ

С.В. Ракша, професор, д.т.н., Ю.К. Горячев, доцент, к.т.н.,
О.С. Куроп'ятник, асистент,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту,

Анотація. Викладено принципи складання математичних моделей навантаженості приводу підвісної канатної дороги маятникового типу, головною особливістю яких є врахування зміщення несучого каната на опорах під час руху вагонів.

Ключові слова: канатна дорога, привід, несучий канат, тяговий канат, навантаженість, окружне зусилля, діаграми.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ ПРИВОДА КАНАТНОЙ ДОРОГИ С УЧЕТОМ СМЕЩЕНИЯ НЕСУЩЕГО КАНАТА НА ОПОРАХ

С.В. Ракша, профессор, д.т.н., Ю.К. Горячев, доцент, к.т.н.,
А.С. Куропятник, ассистент,
Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта

Аннотация. Изложены принципы составления математических моделей нагруженности привода подвесной канатной дороги маятникового типа, главной особенностью которых является учет смещения несущего каната на опорах при движении вагонов.

Ключевые слова: канатная дорога, привод, несущий канат, тяговый канат, нагруженность, окружное усилие, диаграммы.

MODELLING CABLEWAY DRIVE LOADING ADJUSTED FOR LOAD CABLE DISPLACEMENT ON SUPPORTS

S. Raksha, Professor, Doctor of Engineering Sciences,
Yu. Goryachev, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences,
O. Kuropyatnik, teaching assistant,
Dnipropetrovsk National University of Railway Transport

Abstract. The principles of mathematical modeling of a pendulum cableway drive loading are given. Their main feature is adjustment for load cable displacement on supports during the telfer motion.

Key words: cableway, drive, load cable, traction cable, loading, peripheral force, diagrams.

Вступ

З усіх видів канатного транспорту підвісні канатні дороги (ПКД) відносяться до небагатьох, які класифікуються як об'єкти підвищеної небезпеки [1]. Це, в першу чергу, пояснюється великою відповідальністю транспортування вантажів і, особливо, людей на

на значній відстані від землі. Порушення працездатності будь-якого елемента може мати катастрофічні наслідки, тому їх конструкція, методи проектування і контролю постійно вдосконалюються [2–4].

Проектування ПКД різного конструктивного виконання і призначення передбачає багато-

варіантний розрахунок основних параметрів дороги в різних комбінаціях їх значень, з метою отримання максимального техніко-економічного ефекту. При цьому однією з найголовніших задач є пошук оптимально-компромислового рішення, яке поєднує в собі економічну доцільність, технологічність та безпечність конструкції.

Однією з основних характеристик ПКД є продуктивність (для вантажних доріг) або пропускна здатність (для пасажирських доріг). Цей параметр, у поєднанні з економічними показниками і технічними характеристиками, може бути критерієм обґрунтування доцільності проведення модернізації дороги [5]. Однак при такому підході питання навантаженості елементів конструкції і, зокрема, приводу майже не враховуються.

Суттєвий вплив на параметри приводу має профіль ПКД, оскільки його характеристики (довжини прогонів, перепади висот опорних точок і провисання несучого каната тощо) визначають навантаженість усіх елементів системи «привод – тяговий канат – натяжний пристрій». Тому врахування його особливостей при моделюванні процесів, які виявляються впродовж роботи ПКД та формують динамічні навантаження, а також під час розробки рекомендацій щодо вдосконалення дороги є обов'язковим.

Таким чином, проведення досліджень з метою обґрунтування раціональних параметрів ПКД і, зокрема, її приводу з урахуванням особливостей профілю є актуальною задачею з точки зору забезпечення безпеки вантажопасажироперевезень, підвищення продуктивності (пропускної здатності), зменшення матеріаломісткості деталей і вузлів, а також зниження енергоспоживання дороги.

Аналіз публікацій

У роботах [1, 2] відмічається важливість проведення робіт щодо поліпшення методик проектування та діагностування елементів ПКД. Частково вирішенню таких задач сприяють результати робіт [3, 4], проте в них не розглянуто необхідність врахування впливу зміни зусиль у канатах під час руху вагонів на навантаженість елементів приводу. Задача визначення навантаженості несучого каната не є новою і розглядалася багатьма вченими. У роботах [6–8] наведено загальну теорію, яку можна застосовувати для моделювання

лише однопрогонних установок, роботи [9, 10] характеризуються вузькою спеціалізацією. Однак розробок щодо узагальнення підходів до моделювання навантаженості несучих канатів багатопрогонних ПКД маятникового типу не було виявлено. Методики визначення статичної і динамічної навантаженості тягових канатів розглянуто в роботах [13, 20], однак вони не враховують впливу змінності кривої провисання несучого каната під час руху вагона на зусилля в тяговому канаті, а отже, й на окружне зусилля та навантаженість елементів приводу.

Мета і постановка задачі

Метою роботи є розробка математичних моделей, які характеризують навантаженість елементів приводу ПКД маятникового типу. Для реалізації поставленої мети слід розв'язати такі задачі:

- 1) математичне моделювання навантаженості несучого каната з урахуванням його переміщення уздовж опорного башмака під час руху вагона. Крива провисання несучого каната визначає кут підйому вагона, від якого залежить величина опору руху останнього і, відповідно, навантаження, яке сприймає і передає на привод тяговий канат;
- 2) математичне моделювання навантаженості тягового каната з урахуванням зміни опору руху вагона;
- 3) розробка методики побудови діаграм окружних зусиль, за якими можна оцінити зміну навантаженості елементів приводу ПКД під час руху вагонів.

Навантаженість несного каната

Розробку математичних моделей навантаженості будь-якого з елементів маяткової ПКД може бути спрощено шляхом застосування модульного підходу, тобто представлення профілю дороги у вигляді сукупності ділянок з типовими умовами навантаження [11]. Такими ділянками можна вважати прогони, які за характером навантаження несного каната та положенням на трасі поділяються на кілька типів.

В основу математичної моделі кожної з ділянок покладено умову рівноваги несного каната на опорних башмаках при будь-якому положенні вагона у прогоні. Аналогічний підхід було розглянуто в роботі [12] стосовно носійно-тягового каната крісельної ПКД.

Однак наявність кількох одиниць рухомого складу (крісел) у прогоні, особливості будови опор, а також невизначеність кількості прогонів внесли суттєві зміни до математичної моделі.

Вважаємо, що вагон рухається в j -му прогоні (рис. 1), тоді кожен i -й прогін може бути віднесено до одного з таких типів.

У першому випадку $i < j$ – вагон переміщається у прогоні, опорні точки якого характеризуються висотними позначками, меншими, ніж опори i -го прогону. Згідно з розрахунковою схемою (рис. 2) математична модель, яка описує рівновагу несучого каната на опори між $i-1$ -м та i -м прогонами, має вигляд

$$H_i \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_i^B} = H_{i-1} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{i-1}^H} \times \exp(\mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_i^B - \operatorname{tg} \alpha_{i-1}^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_i^B \operatorname{tg} \alpha_{i-1}^H}) ; \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_i^B = \operatorname{tg} \beta_i + \frac{q_n l_i}{2H_i \cos \beta_i} ; \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{i-1}^H = \operatorname{tg} \beta_{i-1} - \frac{q_n l_{i-1}}{2H_{i-1} \cos \beta_{i-1}} , \quad (3)$$

де H_{i-1} , H_i – горизонтальні складові натягу несучого каната в $i-1$ -му та i -му прогонах відповідно; α_{i-1}^H , α_i^B – кути нахилу дотичних до кривої провисання несучого каната біля опори між $i-1$ -м та i -м прогонами; q_n – погонна вага несучого каната.

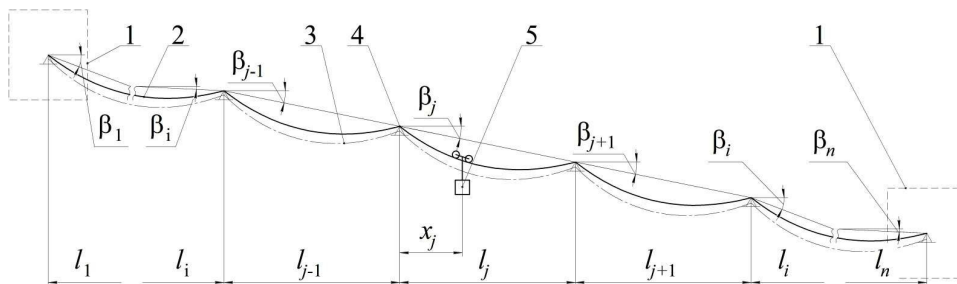


Рис. 1. Схема двоканатної ПКД маятникового типу: 1 – кінцеві станції; 2 – несучий канат; 3 – тяговий канат; 4 – опори; 5 – вагон

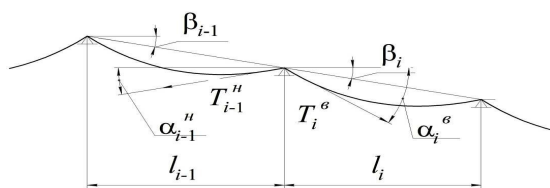


Рис. 2. Розрахункова схема до випадку $i < j$

У другому випадку (рис. 3) $i > j$ – висотні позначки опорних точок i -го прогону є меншими за ті самі величини, що характеризують j -й прогін, тому математична модель набирає вигляду

$$H_i \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_i^H} = H_{i+1} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{i+1}^B} \times \exp(\mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_{i+1}^B - \operatorname{tg} \alpha_i^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_{i+1}^B \operatorname{tg} \alpha_i^H}) ; \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{i+1}^B = \operatorname{tg} \beta_{i+1} + \frac{q_n l_{i+1}}{2H_{i+1} \cos \beta_{i+1}} ; \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_i^H = \operatorname{tg} \beta_i - \frac{q_n l_i}{2H_i \cos \beta_i} . \quad (6)$$

В описаних випадках вагон у модельованому i -му прогоні відсутній. У разі його наявності можна виділити ще три типи ділянок: $i = j = 1$; $i = j = 2, n-1$; $i = j = n$ (n – кількість прогонів). Для спрощення моделей доцільно ввести поняття відносної координати вагона в j -му прогоні

$$\delta_j = x_j / l_j , \quad (7)$$

де x_j – координата, яка вказує відстань між верхньою опорою прогону з вагоном (j -го прогону) та точкою прикладання ваги вагона P до несучого каната, виміряну по горизонталі; $x_j = \operatorname{var}(0; l_j)$, тому $\delta_j = \operatorname{var}(0; 1)$.

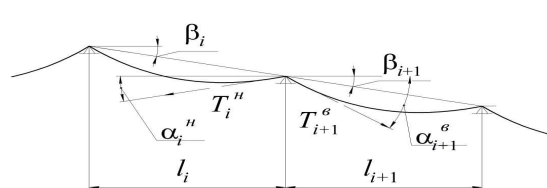


Рис. 3. Розрахункова схема до випадку $i > j$

У випадку $i = j = 1$ (рис. 4) математична модель рівноваги несучого каната на опорі між першим та другим прогонами має вигляд

$$H_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1^H} = H_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2^B} \times \exp\left(\mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_2^B - \operatorname{tg} \alpha_1^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_2^B \operatorname{tg} \alpha_1^H}\right); \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1^H = \operatorname{tg} \beta_1 - \frac{q_n l_1}{2H_1 \cos \beta_1} \cdot (1 + 2k_1 \delta_1); \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2^B = \operatorname{tg} \beta_2 + \frac{q_n l_2}{2H_2 \cos \beta_2}; \quad (9)$$

$$k_1 = \frac{P}{q_n l_1} \cos \beta_1. \quad (10)$$

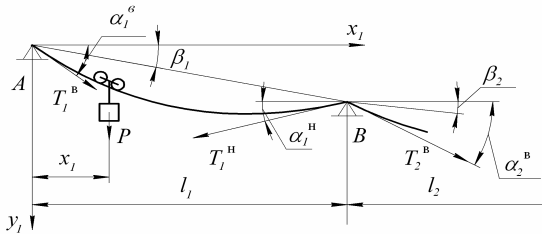


Рис. 4. Розрахункова схема до випадку $i = j = 1$

Випадок $i = j = 2, n-1$ (рис. 5) є найбільш складним, з точки зору математичного моделювання, оскільки вимагає поєднання умов рівноваги несучого каната на опорі між $j-1$ -м і j -м прогонами та j -м і $j+1$ -им прогонами. Тому математична модель набирає такого вигляду

$$H_j \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_j^B} = H_{j-1} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{j-1}^H} \times \exp\left(\mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_j^B - \operatorname{tg} \alpha_{j-1}^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_j^B \operatorname{tg} \alpha_{j-1}^H}\right); \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_j^B = \operatorname{tg} \beta_j + \frac{q_n l_j}{2H_j \cos \beta_j} [1 + 2k_j (1 - \delta_j)]; \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{j-1}^H = \operatorname{tg} \beta_{j-1} - \frac{q_n l_{j-1}}{2H_{j-1} \cos \beta_{j-1}}; \quad (13)$$

$$H_j \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_j^H} = H_{j+1} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{j+1}^B} \times \exp\left(\mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_{j+1}^B - \operatorname{tg} \alpha_j^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_{j+1}^B \operatorname{tg} \alpha_j^H}\right); \quad (14)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_j^H = \operatorname{tg} \beta_j - \frac{q_n l_j}{2H_j \cos \beta_j} \cdot (1 + 2k_j \delta_j); \quad (15)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{j+1}^B = \operatorname{tg} \beta_{j+1} + \frac{q_n l_{j+1}}{2H_{j+1} \cos \beta_{j+1}}; \quad (16)$$

$$k_j = \frac{P}{q_n l_j} \cos \beta_j. \quad (17)$$

У випадку $i = j = n$ (рис. 6) математична модель рівноваги несучого каната на опорі між $n-1$ -м та n -м прогонами має вигляд

$$H_n \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_n^B} = H_{n-1} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{n-1}^H} \times \exp\left(\mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_n^B - \operatorname{tg} \alpha_{n-1}^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_n^B \operatorname{tg} \alpha_{n-1}^H}\right); \quad (18)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_n^B = \operatorname{tg} \beta_n + \frac{q_n l_n}{2H_n \cos \beta_n} [1 + 2k_n (1 - \delta_n)]; \quad (19)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{n-1}^H = \operatorname{tg} \beta_{n-1} - \frac{q_n l_{n-1}}{2H_{n-1} \cos \beta_{n-1}}; \quad (20)$$

$$k_n = \frac{P}{q_n l_n} \cos \beta_n. \quad (21)$$

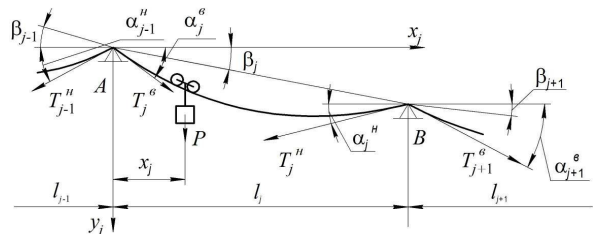


Рис. 5. Розрахункова схема до випадку $i = j = 2, n-1$

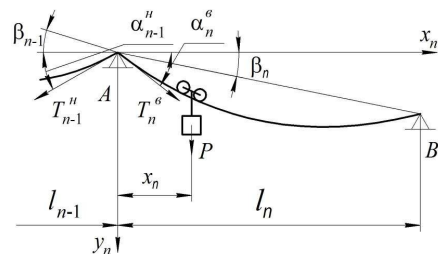


Рис. 6. Розрахункова схема до випадку $i = j = n$

Залежно від профілю дороги математична модель, яка дозволяє оцінити навантаженість несучого каната за величинами H_i , складається з певної кількості наведених вище сис-

тем рівнянь з використанням однієї з трьох додаткових умов, які враховують наявність та місце встановлення натяжного пристрою до несучого каната. При цьому в усіх випадках у першому наближенні вважаємо канат абсолютно гнучкою ниткою, недеформованою в поздовжньому напрямку. Подальше врахування пружних і температурних деформацій може бути виконано, наприклад, за методикою, наведеною в роботі [13].

За відсутності натяжного пристрою довжину несучого каната на трасі можна вважати постійною ($L_k = \text{const}$), тому додаткова умова має вигляд

$$L_k = \sum_{i=1}^{j-1} \left[\frac{l_i}{\cos \beta_i} + \frac{q_n^2 l_i^3 \cos \beta_i}{24 H_i^2} \right] + \left[\frac{l_j}{\cos \beta_j} + \frac{q_n^2 l_j^3 \cos \beta_j}{24 H_j^2} (1 + 12 \delta_j (1 - \delta_j) (k_j^2 + k_j)) \right] + \sum_{i=j+1}^n \left[\frac{l_i}{\cos \beta_i} + \frac{q_n^2 l_i^3 \cos \beta_i}{24 H_i^2} \right] \quad (22)$$

У разі використання натяжного пристрою необхідно враховувати рівновагу несучого каната на станційній опорі. Позначивши робоче зусилля натяжного пристрою як G_0 , а зведений коефіцієнт опору руху його елементів як k_0 , можна скласти додаткові умови.

За умови розміщення натяжного пристрою до несучого каната на верхній станції математична модель складається з таких рівнянь

$$H_1 \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_1^B} = G_0 k_0; \quad (23)$$

$$\text{tg} \alpha_1^B = \text{tg} \beta_1 + \frac{q_n l_1}{2 H_1 \cos \beta_1} [1 + 2 k_1 (1 - \delta_1)]; \quad (24)$$

$$k_1 = \frac{P}{q_n l_1} \cos \beta_1; \quad (25)$$

$$P = \begin{cases} \text{const}, j = 1; \\ 0, j \neq 1. \end{cases} \quad (26)$$

У разі розміщення натяжного пристрою до несучого каната на нижній станції математична модель набирає вигляду

$$H_n \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_n^B} = G_0 k_0; \quad (27)$$

$$\text{tg} \alpha_n^B = \text{tg} \beta_n - \frac{q_n l_n}{2 H_n \cos \beta_n} (1 + 2 k_n \delta_n); \quad (28)$$

$$k_n = \frac{P}{q_n l_n} \cos \beta_n; \quad (29)$$

$$P = \begin{cases} \text{const}, j = n; \\ 0, j \neq n. \end{cases} \quad (30)$$

Головною перевагою методики є можливість формування математичної моделі навантаженості несучого каната з урахуванням його переміщення на опорах маятникової ПКД (вантажної або пасажирської) з профілем будь-якої складності шляхом поєднання відповідних систем рівнянь у необхідній кількості.

Застосування наведених принципів у різних варіаціях дозволило розв'язати ряд задач з визначення раціональних параметрів профілю ПКД маятникового типу [14–17].

Навантаженість тягового каната

Згідно з «Правила ...» [18, 19] статичне зусилля в тяговому канаті визначається як сума кількох величин: робочого зусилля натяжного пристрою, складових маси каната (розподілене навантаження) та рухомого складу (опір переміщенню вагонів), опорів у натяжному пристрої, опорних роликів і шківів на станціях. Динаміка каната описується рівняннями хвильової механіки, які дозволяють моделювати контур «привод – тяговий канат – натяжний пристрій» як систему з розподіленими параметрами [13, 20].

Під час визначення статичного зусилля у тяговому канаті за основу може бути взято формулу з роботи [6], яка після здійснення математичних перетворень з урахуванням особливостей запасування тягового каната ПКД маятникового типу набирає вигляду

$$T = P \sin \gamma \pm P C_p \cos \gamma + W, \quad (31)$$

де P – вага вагона; γ – кут підйому вагона; C_p – зведений коефіцієнт опору руху вагона; W – складова натягу від власної ваги каната з урахуванням робочого зусилля натяжного пристрою.

У цій формулі знак «плюс» відповідає руху вагона уверх, а «мінус» – руху вниз.

Кут підйому вагона визначається параметрами профілю дороги (довжина l і перепад висот h прогонів, провисання несучого каната тощо) з урахуванням впливу ваги тягового каната

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \beta + \frac{P \cos \beta + (q_n + q_t) l \left(1 - 2 \frac{x}{l}\right)}{2H \cos \beta}, \quad (32)$$

де $\beta = \arctg(h/l)$ – кут нахилу хорди прогону; q_t – погонна вага тягового каната; x – координата, яка визначає положення вагона у прогоні по горизонталі щодо верхньої опори.

Величина W визначається за формулою

$$W = T_0 \pm q_t (h_c + fl_c), \quad (33)$$

де T_0 – робоче зусилля натяжного пристрою, яке сприймається однією віткою тягового каната (зусилля передається на канат через обвідний шків); h_c – перепад висот по кінцевих опорних точках профілю; l_c – довжина горизонтальної проекції траси; f – коефіцієнт опору руху тягового каната.

У цій формулі знак «плюс» відповідає руху вагона уверх, а «мінус» – руху вниз.

З наведеного видно, що зусилля в тяговому канаті безпосередньо залежить від форми кривої провисання несучого каната, яка визначається величиною H , а також власної ваги несучого каната. Це вказує на необхідність розглядати ці канати як систему під час розв'язання задач щодо визначення раціональних параметрів ПКД та її окремих елементів.

Одним із факторів впливу на тяговий канат є пружні властивості несучого каната. Оскільки під час руху вагона натяг несучого каната змінюється, величина його пружної деформації (видовження) також є непостійною, що має вплив на форму кривої провисання, а отже, й на зусилля в тяговому канаті.

Було проведено дослідження впливу пружних властивостей несучого каната на зусилля у тяговому канаті на основі використання методу послідовних наближень, суть якого полягає у такому [13]:

1) за відомими параметрами профілю ПКД визначається довжина несучого каната в недеформованому стані (L_k);

2) визначається середній натяг несучого каната у недеформованому стані за формулою

$$T_{\text{сер}0} = 0,5(T_{\text{max}0} + T_{\text{min}0}), \quad (34)$$

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

$$T_{\text{max}0} = H_0 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_0^B}; \quad (35)$$

$$T_{\text{min}0} = H_0, \quad (36)$$

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

3) визначається пружне видовження каната у першому наближенні за формулою

$$\Delta L_1 = L_k \frac{T_{\text{сер}0}}{EF}; \quad (37)$$

4) визначається уточнене значення довжини каната у першому наближенні за формулою

$$L_{k1} = L_k + \Delta L_1; \quad (38)$$

5) визначається уточнене значення максимального натягу у першому наближенні за формулою

$$T_{\text{max}1} = H_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1^B}, \quad (39)$$

де H_1 , α_1^B – уточнені значення відповідних величин у першому наближенні, формули для розрахунку яких залежать від наявності та місця встановлення натяжного пристрою до несеного каната;

6) визначається відхилення уточненого значення максимального натягу каната за першим наближенням від максимального натягу каната у недеформованому стані за формулою

$$\Delta T_1 = \frac{|T_{\text{max}1} - T_{\text{max}0}|}{T_{\text{max}0}} \cdot 100\%; \quad (40)$$

7) якщо $\Delta T_1 > \xi$ (зазвичай приймають $\xi \leq 1\%$ [13]), повторюють розрахунки п. 3–6, формули в яких замінюють на такі

$$\Delta L_i = L_k \frac{T_{\text{сеп}i-1}}{EF}; \quad (41)$$

$$L_{ki} = L_k + \Delta L_i; \quad (42)$$

$$T_{\text{max}i} = H_i \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_i^B}; \quad (43)$$

$$\Delta T_i = \frac{|T_{\text{max}i} - T_{\text{max}i-1}|}{T_{\text{max}i-1}} \cdot 100\%, \quad (44)$$

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

Дослідження показали, що вплив пружних властивостей несучого каната відбивається у збільшенні його натягу в середньому на 10–15 %, тоді як зміна зусилля у тяговому канаті не перевищує 1 %. Отже, під час виконання досліджень, пов'язаних з навантаженістю тягового каната, впливом пружних властивостей несучого каната можна знехтувати.

Діаграми окружних зусиль

Окружне зусилля є одним із параметрів приводу, який характеризує його тягову спроможність та може виступати критерієм оцінки навантаженості елементів приводу (таких як вали, підшипникові вузли, опорні елементи тощо). Тому дослідження щодо обґрунтування раціональних значень окружного зусилля є актуальними з точки зору зменшення матеріаломісткості та зниження енергоспоживання приводу. Останнє твердження ґрунтується на прямій залежності споживаної потужності P від окружного зусилля F_0 приводу

$$P = \frac{F_0 v}{\eta}, \quad (45)$$

де v – швидкість руху вагонів; η – ККД приводу.

Зміна діаграм окружних зусиль, побудованих експериментальним шляхом через певні проміжки часу, дозволяє також оцінити зміну стану електричного та механічного обладнання ПКД [21].

Для побудови діаграм окружних зусиль аналітичним шляхом пропонується використовувати математичні моделі, які ґрунтуються

на наведених вище принципах модульного компонування. Такий підхід є універсальним і дозволяє отримувати залежності окружного зусилля приводу від положення вагона на трасі з урахуванням проектних характеристик ПКД, внесених впродовж експлуатації конструктивних змін та впливу процесу переміщення несучого каната уздовж опор під час руху вагона.

Для визначення величини окружного зусилля приводу ПКД маятникового типу необхідно моделювати зустрічний синхронний рух вагонів. Оскільки вони з'єднані між собою тяговим канатом, переміщення вагона з верхньої станції до нижньої (надалі – верхній вагон) уздовж траси дорівнює переміщенню вагона з нижньої станції до верхньої (надалі – нижній вагон). Положення вагона, який рухається вниз, визначає зусилля у вітці тягового каната, яка збігає з приводного шківів (T_{36}), а положення вагона, який рухається вверх, – зусилля у вітці тягового каната, яка набігає на приводний шків ($T_{н6}$). При цьому окружне зусилля може бути визначене за формулою

$$F_0 = T_{н6} - T_{36}. \quad (46)$$

Величини $T_{н6}$ і T_{36} можна визначити за формулами

$$T_{н6} = P_n \sin \gamma_n + P_n C_p \cos \gamma_n + W_n; \quad (47)$$

$$T_{36} = P_b \sin \gamma_b - P_b C_p \cos \gamma_b + W_b, \quad (48)$$

де P_n , P_b – складові ваги нижнього та верхнього вагонів відповідно, які сприймаються одним тяговим канатом (дорога може мати декілька тягових канатів); γ_n , γ_b – кути підйому нижнього та верхнього вагонів відповідно; W_n , W_b – складові натягу віток каната від власної ваги (з урахуванням робочого зусилля натяжного пристрою) з боку нижнього та верхнього вагонів відповідно.

Під час розрахунку пікових значень окружного зусилля необхідно розглядати два сполучення умов навантаження

– нижній вагон повністю завантажений, верхній – порожній

$$P_n = \frac{P + P_0}{n_T}; \quad (49)$$

$$P_B = \frac{P_0}{n_T}; \quad (50)$$

– верхній вагон повністю завантажений, нижній – порожній

$$P_B = \frac{P + P_0}{n_T}; \quad (51)$$

$$P_H = \frac{P_0}{n_T}, \quad (52)$$

де P – корисне навантаження (вага вантажу або пасажирів); P_0 – вага порожнього вагона; n_T – кількість тягових канатів.

Значення кутів підйому вагонів визначаються із виразів

$$\operatorname{tg} \gamma_H = \operatorname{tg} \beta + \frac{P_H \cos \beta + (q_H + q_T) l \left(1 - 2 \frac{x_H}{l}\right)}{2H \cos \beta}; \quad (53)$$

$$\operatorname{tg} \gamma_B = \operatorname{tg} \beta + \frac{P_B \cos \beta + (q_H + q_T) l \left(1 - 2 \frac{x_B}{l}\right)}{2H \cos \beta}, \quad (54)$$

де x_H , x_B – координати, які визначають положення нижнього та верхнього вагонів по горизонталі відносно верхніх опор відповідних прогонів.

Складові натягу віток тягового каната від власної ваги (з урахуванням робочого зусилля натяжного пристрою) визначаються за формулами

$$W_H = T_0 + q_T (h_c + f \cdot l_c); \quad (55)$$

$$W_B = T_0 - q_T (h_c + f \cdot l_c). \quad (56)$$

Побудова діаграм окружних зусиль експериментальним шляхом [21] ґрунтується на залежності обертового моменту вала електродвигуна M від сили струму якоря I

$$M = k\Phi \cdot I, \quad (57)$$

де k – коефіцієнт, який залежить від особливостей будови електродвигуна; Φ – потік збудження.

Враховуючи відносну стабільність величини $k\Phi$ у всіх режимах роботи, її можна визначити за номінальними характеристиками двигуна

$$k\Phi = \frac{M_H}{I_H}, \quad (58)$$

де $M_H = 9550 P_{дв} / n_{дв}$ – номінальний обертовий момент на валу двигуна, Nm ($P_{дв}$, $n_{дв}$ – потужність, кВт, та частота обертання вала, об/хв); I_H – номінальний струм якоря, A (паспортна характеристика двигуна).

Знаючи діаметр приводного шківів D , передачне число u та ККД η приводу, можна встановити залежності між окружним зусиллям F_0 і силою струму I у режимах роботи:

– силовому

$$F_0 = \frac{2k\Phi u \eta}{D} \cdot I; \quad (59)$$

– гальмівному

$$F_0 = \frac{2k\Phi u}{D\eta} \cdot I. \quad (60)$$

Використовуючи сучасні засоби реєстрації зміни сили струму в часі, можна записати осцилограми струму під час роботи ПКД за різних умов навантаження. Подальша математична обробка з використанням числових методів та врахуванням наведених вище залежностей дозволяє отримати діаграми окружних зусиль.

Використання зазначених підходів дозволило розв'язати ряд задач, пов'язаних з математичним моделюванням навантаженості елементів приводу та розробкою рекомендацій щодо раціонального профілювання ПКД. Зокрема було встановлено наявність стрімкої зміни (так званого стрибка) окружного зусилля під час проходження вагонами опор (рис. 7; [22]) та надано рекомендації щодо поліпшення профілю маятникової ПКД «Місхор – Ай-Петрі» [23, 24].

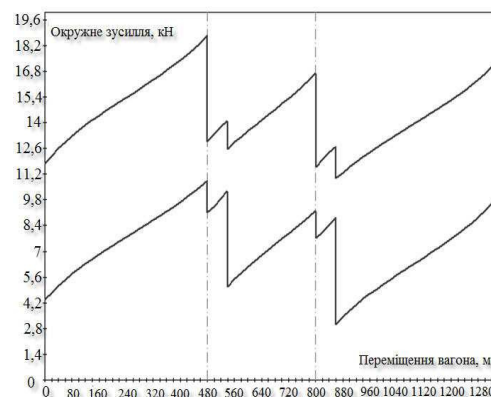


Рис. 7. Діаграми окружних зусиль приводу маятникової ПКД

Висновки

З усього наведеного вище видно, що процес моделювання навантаженості елементів приводу ПКД з урахуванням зміщення несучого каната на опорах є доволі складним і передбачає реалізацію кількох етапів:

- 1) аналіз і підготовка вихідних даних у певних їх поєднаннях для дослідження критичних випадків навантаження;
- 2) математичне моделювання кривої провисання несучого каната та отримання функції зміни величини натягу (або його горизонтальної складової) каната у часі (або у вигляді залежності від положення вагона у прогоні);
- 3) побудова діаграм окружних зусиль приводу для критичних випадків навантаження;
- 4) аналіз діаграм і обґрунтування раціональної величини окружного зусилля приводу з урахуванням зміни параметрів профілю, що дає можливість формувати рекомендації щодо зменшення матеріаломісткості та зниження енергоспоживання ПКД.

Література

1. Пірко В.М. Експертиза канатних доріг: досвід, проблеми, перспективи / В.М. Пірко // Перспективи рынка лифтов, эскалаторов, канатных дорог в Украине (08–10 декабря 2005 г.): материалы международных научно-практических конференций по подъемным сооружениям за 2005 год. – Одесса: Астропринт, 2006. – С. 212–215.
2. Лизанчук С. Канатним дорогам – безпечний європейський підхід / С. Лизанчук // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2010. – № 8. – С. 6.
3. Кинжибалов А.В. Повышение безопасности пассажирских канатных дорог на основе оценки риска и резервирования привода: автореф. дис. ... на соискание учён. степени канд. техн. наук: 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины» / Кинжибалов Александр Владимирович. – Новочеркасск, 2008. – 24 с.
4. Мироненко А.С. Неразрушающий контроль стальных канатов пассажирских канатных дорог / А.С. Мироненко, И.И. Шпаков // Монтажные и специальные работы в строительстве. Стальные конструкции. – 2007. – № 9. – С. 9–11.
5. Сванидзе Л.Г. Размещение опор маятниковой канатной дороги / Л.Г. Сванидзе, В.Ф. Супрунов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2009. – № 4. – С. 47–49.
6. Беркман М.Б. Подвесные канатные дороги / М. Б. Беркман. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
7. Дукельский А.И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны / А.И. Дукельский. – М.–Л.: Машиностроение, 1966. – 484 с.
8. Лепеха О.Г. Імітаційне моделювання роботи несучих канатів підвісних систем / О.Г. Лепеха // Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість: міжвідомчий науково-технічний збірник. – Львів: УкрДЛТУ. – 2003. – № 28. – С. 68–76.
9. Adamovskyy M.G. Design calculations of main components and parametric substantiation of cable yarding system used in group-selection felling operations / M. Adamovskyy, M. Martyntsiv, O. Boratynskyy // Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість: міжвідомчий науково-технічний збірник. – Львів: НЛТУ України. – 2011. – № 37.2. – С. 6–13.
10. Белая Н.М. Канатные лесотранспортные установки / Н.М. Белая, А.Г. Прохоренко. – М.: Лесн. пром-сть, 1964. – 300 с.
11. 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. Сер. «Галузеве машинобудування, будівництво». – 2010. – № 2 (27). – С. 205–214.
12. Сологуб Б.В. Аналіз напружено-деформованого стану тягово-несного канату крісельної дороги в зоні проміжної опори / Б.В. Сологуб // Підйомно-транспортна техніка. – 2011. – № 2. – С. 3–10.
13. Патарая Д. И. Расчет и проектирование канатных систем на примере подвесных дорог / Д.И. Патарая. – Тбилиси: Мецниереба, 1991. – 103 с.
14. Горячев Ю.К. Дослідження впливу змінності параметрів провисання на зусилля розтягу несучого каната підвісної дороги / Ю.К. Горячев, О.С. Куроп'ятник // Підйомно-транспортна техніка. – 2009. – № 1. – С. 48–53.

15. Горячев Ю.К. Дослідження процесу перерозподілу довжини несучого каната під час монтажу підвісної дороги / Ю.К. Горячев, О. С. Куроп'ятник // Підйомно-транспортна техніка. – 2009. – № 2. – С. 54–58.
 16. Горячев Ю. К. Дослідження процесу перерозподілу довжини несучого каната підвісної дороги під час руху вагона / Ю. К. Горячев, О. С. Куроп'ятник // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2010. – № 1 (18). – С. 67–72.
 17. Горячев Ю. К. Рациональное размещение опоры двухпролетной маятниковой подвесной дороги / Ю.К. Горячев, А.С. Куропятник // Подъемно-транспортная техника. – 2010. – № 2. – С. 87–93.
 18. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузовых подвесных канатных дорог (ГПКД). – М.: Недра, 1973. – 30 с.
 19. Правила устройства и безопасной эксплуатации пассажирских подвесных канатных дорог (ППКД). – М.: Metallurgia, 1975. – 56 с.
 20. Степанов А.Г. Динамика машин / А.Г. Степанов. – Екатеринбург: УрОРАН, 1999. – 305 с.
 21. Сванидзе Л.Г. Окружные усилия на шкивах канатных дорог / Л.Г. Сванидзе, В.Ф. Супрунов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2008. – № 7. – С. 48–50.
 22. Горячев Ю.К. Построение диаграмм окружных усилий привода маятниковой подвесной канатной дороги / Ю.К. Горячев // Подъемно-транспортная техника. – 2010. – № 4. – С. 56–63.
 23. Горячев Ю. К. Улучшение профиля маятниковой подвесной канатной дороги / Ю.К. Горячев, А.С. Куропятник // Транспортні системи і технології: зб. наук. пр. – 2011. – № 18. – С. 24–28.
 24. Горячев, Ю.К. До питання про раціональне розміщення опор підвісної канатної дороги маятникового типу / Ю.К. Горячев, О.С. Куроп'ятник // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2011. – № 2 (33). – С. 30–37.
- Рецензент: І.Г. Миренський, професор, д.т.н., ХНАДУ.
- Стаття надійшла до редакції 26 травня 2012 г.
-