

**Моделивання 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, ДНУЗТ**

*Анотація.* У роботі 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, привод, 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, ДНУЗТ**

*Аннотация.* В работе 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.

**The Modelling of Loading of the Ropeway Drive with Taking into Account the  
Displacement of a Track Cable on a Tower**

**S. V. Raksha, Professor, Dr. Tech. Sci., U. K. Goryachev, Associate professor,  
Cand. Tech. Sci., A. S. Kuropyatnick, assistant, DNURT**

*Abstract.* In this article we describe the principles of compiling of mathematical models of loading of the reversible ropeway drive. The main feature of this approach is the taking into account of the displacement of a track cable on a tower at movement of cabins.

*Keywords:* ropeway, drive, track cable, hauling rope, loading, turning effort, 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 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 багатоваріантний 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-компромісного 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 вантажо- та пасажироперевезень, 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 вплив 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 роботи**

Метою даної 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 несучого каната**

Розробка математичних моделей навантаженості будь-якого з елементів маяткової ПКД може бути спрощена

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 несучого каната та положенням на трасі поділяються на кілька типів.

В основу математичної моделі кожної з ділянок покладено умову рівноваги несучого каната на опорних башмаках при будь-якому

положенні вагона в прогоні. Аналогічний підхід було розглянуто в роботі [12] стосовно несуче-тягового каната крісельної ПКД. Однак наявність кількох одиниць рухомого складу (крісел) в прогоні, особливості будови опор, а також невизначеність кількості прогонів внесли суттєві зміни до математичної моделі.

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

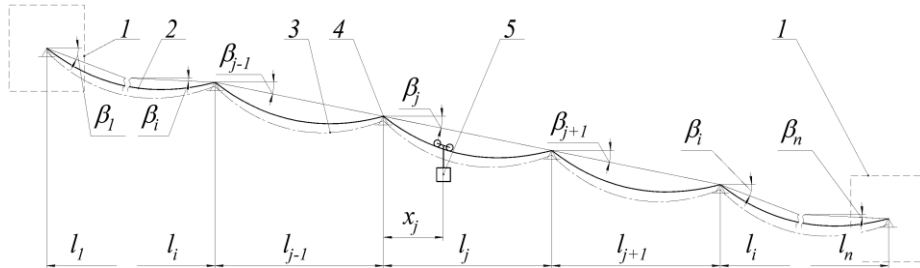


Рис. 1. Схема двоканатної ПКД маятникового типу:  
 1 – кінцеві станції; 2 – несучий канат; 3 – тяговий канат; 4 – опори; 5 – вагон

У першому випадку  $i < j$  – вагон переміщується в прогоні, опорні точки якого характеризуються висотними позначками, меншими, ніж опори  $i$ -ого прогону. Згідно розрахункової схеми (рис. 2) математична модель, яка описує рівновагу несучого каната на опорі між  $i-1$ -им та  $i$ -им прогонами, має вигляд:

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

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

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

де  $H_{i-1}$ ,  $H_i$  – горизонтальні складові натягу несучого каната в  $i-1$ -ому та  $i$ -ому прогонах відповідно;

$\alpha_{i-1}^H$ ,  $\alpha_i^B$  – кути нахилу дотичних до кривої провисання несучого каната біля опори між  $i-1$ -им та  $i$ -им прогонами;

$q_n$  – погонна вага несучого каната.

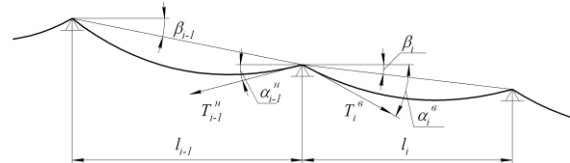


Рис. 2. Розрахункова схема до випадку  $i < j$

У другому випадку (рис. 3)  $i > j$  – висотні позначки опорних точок  $i$ -ого прогону менші за ті ж величини, що характеризують  $j$ -ий прогін, тому математична модель набуває вигляду:

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

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

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

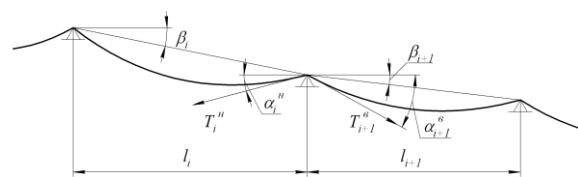


Рис. 3. Розрахункова схема до випадку  $i > j$

В описаних випадках вагон у модельованому  $i$ -ому 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  $j$ -ому прогоні

$$\delta_j = x_j / l_j,$$

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

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

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

$$\text{tg} \alpha_1^H = \text{tg} \beta_1 - \frac{q_n l_1}{2H_1 \cos \beta_1} \cdot \left( + 2k_1 \delta_1 \right);$$

$$\text{tg} \alpha_2^B = \text{tg} \beta_2 + \frac{q_n l_2}{2H_2 \cos \beta_2}; \quad k_1 = \frac{P}{q_n l_1} \cos \beta_1.$$

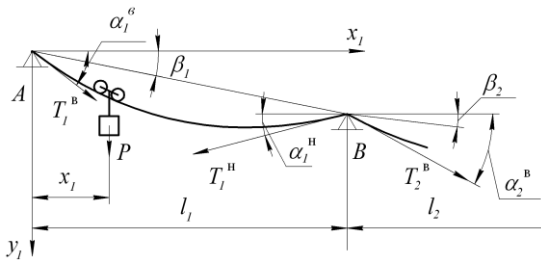


Рис. 4. Розрахункова схема до випадку  $i = j = 1$

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  $j-1$ -им і  $j$ -им прогонами та  $j$ -им і  $j+1$ -им прогонами. Тому математична модель набуває такого вигляду:

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

$$\text{tg} \alpha_j^B = \text{tg} \beta_j + \frac{q_n l_j}{2H_j \cos \beta_j} \cdot \left( + 2k_j \delta_j \right);$$

$$\text{tg} \alpha_{j-1}^H = \text{tg} \beta_{j-1} - \frac{q_n l_{j-1}}{2H_{j-1} \cos \beta_{j-1}};$$

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

$$\text{tg} \alpha_j^H = \text{tg} \beta_j - \frac{q_n l_j}{2H_j \cos \beta_j} \cdot \left( - 2k_j \delta_j \right);$$

$$\text{tg} \alpha_{j+1}^B = \text{tg} \beta_{j+1} + \frac{q_n l_{j+1}}{2H_{j+1} \cos \beta_{j+1}};$$

$$k_j = \frac{P}{q_n l_j} \cos \beta_j.$$

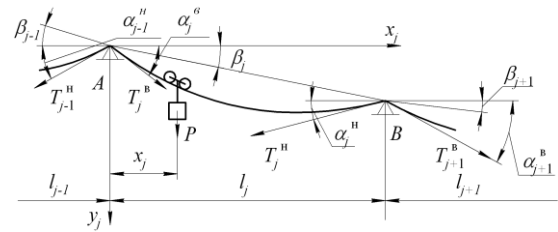


Рис. 5. Розрахункова схема до випадку  $i = j = 2, n - 1$

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

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

$$\text{tg} \alpha_n^B = \text{tg} \beta_n + \frac{q_n l_n}{2H_n \cos \beta_n} \cdot \left( + 2k_n \delta_n \right);$$

$$\text{tg} \alpha_{n-1}^H = \text{tg} \beta_{n-1} - \frac{q_n l_{n-1}}{2H_{n-1} \cos \beta_{n-1}};$$

$$k_n = \frac{P}{q_n l_n} \cos \beta_n.$$

В залежності від профілю дороги математична модель, яка дозволяє оцінити навантаженість несучого каната за величинами  $H_i$ , складається з певної кількості наведених вище систем 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].

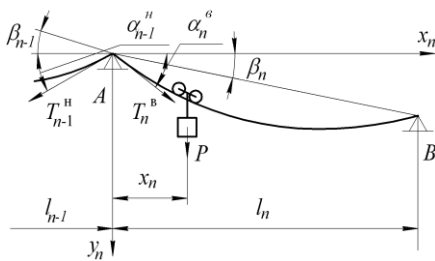


Рис. 6. Розрахункова схема до випадку  $i = j = n$

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

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

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:

$$H_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1^B} = G_0 k_0;$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1^B = \operatorname{tg} \beta_1 + \frac{q_n l_1}{2 H_1 \cos \beta_1} \left[ +2 k_1 \left( -\delta_1 \right)^2 \right];$$

$$k_1 = \frac{P}{q_n l_1} \cos \beta_1; \quad P = \begin{cases} const, & j = 1; \\ 0, & j \neq 1. \end{cases}$$

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

$$H_n \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_n^H} = G_0 k_0;$$

$$\operatorname{tg} \alpha_n^H = \operatorname{tg} \beta_n - \frac{q_n l_n}{2 H_n \cos \beta_n} \left( +2 k_n \delta_n \right)^2;$$

$$k_n = \frac{P}{q_n l_n} \cos \beta_n; \quad P = \begin{cases} const, & j = n; \\ 0, & j \neq n. \end{cases}$$

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 «Правил ...» [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 прийнята формула з роботи [6], яка після здійснення математичних перетворень з урахуванням особливостей запасування тягового каната ПКД маятникового типу набуває вигляду

$$T = P \sin \gamma \pm PC_p \cos \gamma + W,$$

де  $P$  – вага вагона;

$\gamma$  – 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:

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

де  $\beta = \arctg(h/l)$  – кут нахилу хорди прогону;

$q_t$  – погонна вага тягового каната;

$x$  – координата, яка визначає положення вагона в прогоні по горизонталі відносно верхньої опори.

Величина  $W$  визначається за формулою

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

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 кінцевим опорним точкам 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.

Були проведені дослідження впливу пружних властивостей несучого каната на зусилля у тяговому канаті на основі використання методу послідовних наближень, суть якого полягає у наступному [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

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

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

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

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

де  $H_0$  – горизонтальна складова натягу каната у недеформованому стані;

$\alpha_0^B$  – кут нахилу дотичної до кривої провисання несучого каната в найвищій її точці;

3) визначається пружне видовження каната у першому наближенні за формулою

$$\Delta L_1 = L_k \frac{T_{\text{сер}0}}{EF};$$

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

$$L_{k1} = L_k + \Delta L_1;$$

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

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

де  $H_1$ ,  $\alpha_1^B$  – уточнені значення відповідних величин у першому наближенні, формули для розрахунку яких залежать від наявності та місця встановлення натяжного пристрою до несучого каната;

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

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

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

$$\Delta L_i = L_k \frac{T_{\text{сер}i-1}}{EF};$$

$$L_{ki} = L_k + \Delta L_i;$$

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

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

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:

$$P = \frac{F_0 v}{\eta},$$

де  $v$  – швидкість руху вагонів;  
 $\eta$  – 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 шків (T<sub>зб</sub>), а положення вагона, який рухається вверх – зусилля у вітці тягового каната, яка набігає на приводний шків (T<sub>нб</sub>). При цьому окружне зусилля може бути визначено за формулою

$$F_o = T_{нб} - T_{зб}.$$

Величини T<sub>нб</sub> і T<sub>зб</sub> можуть бути визначені за формулами:

$$T_{нб} = P_n \sin \gamma_n + P_n C_p \cos \gamma_n + W_n;$$

$$T_{зб} = P_b \sin \gamma_b - P_b C_p \cos \gamma_b + W_b,$$

де P<sub>н</sub>, P<sub>в</sub> – складові ваги нижнього та верхнього вагонів відповідно, які сприймаються одним тяговим канатом (дорога може мати декілька тягових канатів); γ<sub>н</sub>, γ<sub>в</sub> – кути підйому нижнього та верхнього вагонів відповідно; W<sub>н</sub>, W<sub>в</sub> – 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:

$$P_n = \frac{P + P_0}{n_T}; \quad P_b = \frac{P_0}{n_T};$$

- верхній вагон повністю завантажений, нижній – порожній:

$$P_b = \frac{P + P_0}{n_T}; \quad P_n = \frac{P_0}{n_T},$$

де P – корисне навантаження (вага вантажу або пасажирів);

P<sub>0</sub> – вага порожнього вагона;

n<sub>T</sub> – кількість тягових канатів.

Значення кутів підйому вагонів визначаються із виразів:

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \beta + \frac{P_n \cos \beta + \underbrace{q_n + q_T}_{\text{}}}{2H \cos \beta} \left( 1 - 2 \frac{x_n}{l} \right);$$

$$\operatorname{tg} \gamma_b = \operatorname{tg} \beta + \frac{P_b \cos \beta + \underbrace{q_n + q_T}_{\text{}}}{2H \cos \beta} \left( 1 - 2 \frac{x_b}{l} \right),$$

де x<sub>н</sub>, x<sub>в</sub> – 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:

$$W_n = T_0 + q_T \underbrace{C_c + f l_c}_{\text{}};$$

$$W_b = T_0 - q_T \underbrace{C_c + f l_c}_{\text{}}.$$

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

$$M = k \Phi \cdot I,$$

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

Враховуючи відносну стабільність величини kΦ у всіх режимах роботи, її можна визначити за номінальними характеристиками двигуна:

$$k \Phi = \frac{M_n}{I_n},$$

де M<sub>н</sub> = 9550 P<sub>дв</sub> / n<sub>дв</sub> – номінальний обертовий момент на валу двигуна, Нм (P<sub>дв</sub>, n<sub>дв</sub> – потужність, кВт, та частота обертання вала, об/хв); I<sub>н</sub> – номінальний струм якоря, А (паспортна характеристика двигуна).

Знаючи діаметр приводного шків D, передаточне число u та ККД η приводу, можна встановити залежності між окружним зусиллям F<sub>о</sub> і силою струму I у режимах роботи:



- силовому

$$F_o = \frac{2k\Phi u \eta}{D} \cdot I;$$

- гальмівному

$$F_o = \frac{2k\Phi u}{D\eta} \cdot I.$$

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].

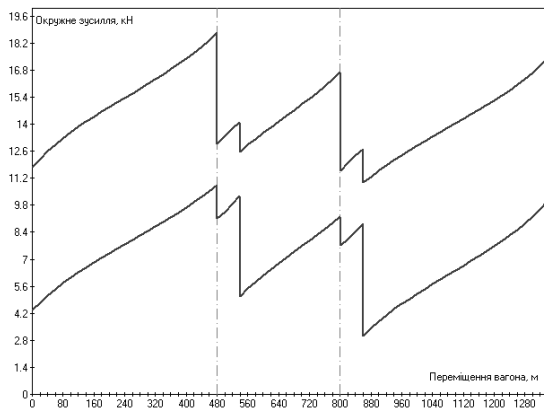


Рис. 7. Діаграми окружних зусиль приводу маятничкової ПКД

### Висновки

З усього вище наведеного видно, що процес моделювання навантаженості елементів приводу ПКД з врахуванням 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 в прогоні);

3) побудова діаграм окружних зусиль приводу для критичних випадків навантаження;

4) аналіз діаграм і обґрунтування раціональної величини окружного зусилля приводу з врахуванням 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 [Текст] / В. М. Пірко // Матеріали міжнародних научно-практичних конференцій по підъемним сооружениям за 2005 год. Перспективы рынка лифтов, эскалаторов, канатных дорог в Украине (08–10.12.2005). – Одесса: Астропринт, 2006. – С. 212–215.
2. Лизанчук, С. Канатним дорогам – безпечний європейський підхід [Текст] / С. Лизанчук // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2010. – № 8.
3. Кинжибалов, А. В. Повышение безопасности пассажирских канатных дорог на основе оценки риска и резервирования привода [Текст]: автореферат дис. ... канд. техн. наук: защищена 26.12.2008 / Кинжибалов Александр Владимирович. – Новочеркасск, 2008. – 24 с.
4. Мироненко, А. С. Неразрушающий контроль стальных канатов пассажирских канатных дорог [Текст] / 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 [Текст] / Л. Г. Сванидзе, В. Ф. Супрунов //

- Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2009. – № 4.
6. Беркман, М. Б. Подвесные канатные дороги [Текст] / М. Б. Беркман [и др.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
  7. Дукельский, А. И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны [Текст] / А. И. Дукельский. – М.-Л.: Машиностроение, 1966. – 484 с.
  8. Лепеха, О. Г. Імітаційне моделювання роботи несучих канатів підвісних систем [Текст] / 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 [Text] / M. G. Adamovskyy, M. P. Martyntsiy, O. V. 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 [Текст] / Н. М. Белая, А. Г. Прохоренко. – М.: Лесн. пром-сть, 1964. – 299 с.
  11. Горячев, Ю. К. Применение принципа модульной компоновки к математическому моделированию нагруженности несущего каната маятниковой подвесной дороги [Текст] / Ю. К. Горячев, А. С. Куроп'ятник // Збірник наукових праць ПолтНТУ. Серія: 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 [Текст] / Б. В. Сологуб // Підйомно-транспортна техніка. – 2011. – № 2. – С. 3–10.
  13. Патарая, Д. И. Расчет и проектирование канатных систем на примере подвесных дорог [Текст] / Д. И. Патарая. – Тбилиси: Мецниереба, 1991. – 103 с.
  14. Горячев, Ю. К. Дослідження впливу змінності параметрів провисання на зусилля розтягу несучого каната підвісної дороги [Текст] / 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 [Текст] / 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 [Текст] / 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 [Текст] / Ю. К. Горячев, А. С. Куроп'ятник // Подъемно-транспортная техника. – 2010. – № 2. – С. 87–93.
  18. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузовых подвесных канатных дорог (ГПКД) [Текст]. – М.: Недра, 1973. – 30 с.
  19. Правила устройства и безопасной эксплуатации пассажирских подвесных канатных дорог (ППКД) [Текст]. – М.: Металлургия, 1975. – 56 с.
  20. Степанов, А. Г. Динамика машин [Текст] / А. Г. Степанов. – Екатеринбург: УрОРАН, 1999. – 305 с.
  21. Сванидзе, Л. Г. Окружные усилия на шкивах канатных дорог [Текст] / 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 [Текст] / Ю. К. Горячев [и др.] // Подъемно-транспортная техника. – 2010. – № 4. – С. 56–63.
  23. Горячев, Ю. К. Улучшение профиля маятниковой подвесной канатной дороги [Текст] / Ю. К. Горячев, А. С. Куроп'ятник // Збірник наукових праць ДЕТЕТ «Транспортні системи і технології». – 2011. – № 18. – С. 24–28.
  24. Горячев, Ю. К. До питання про раціональне розміщення опор підвісної канатної дороги маятикового типу [Текст] /

Ю. К. Горячев, О. С. Куроп'ятник //  
Вісник Донбаської державної  
машинобудівної академії. – 2011. – № 2  
(33). –  
С. 30–37.

Рецензент:

Стаття надійшла до редакції