

## УДК 625.57:621.311

О. С. КУРОП'ЯТНИК<sup>1\*</sup>, О. Л. КРАСНОЩОК<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 674 26 44, ел. пошта kuropyatnick@gmail.com, ORCID 0000-0001-5581-3883

<sup>2\*</sup>Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (098) 706 27 43, ел. пошта akrasnoshchok1996@gmail.com, ORCID 0000-0002-0140-5179

## Уточнення методики визначення характеристик канатних доріг

**Мета.** У цій роботі поставлено за мету уточнити методику та розробку алгоритму визначення характеристик канатних доріг традиційної конструкції та із самохідними вагонами із врахуванням нових факторів впливу. **Методика.** Проведено аналіз наявних методик визначення характеристик канатних доріг різних конструкцій. Досягнення зазначеної мети здійснено шляхом врахування ваги індивідуального приводу та фактичного кута підйому вагона відносно горизонту – для самохідного вагона; впливу коефіцієнта зчеплення каната з натяжним шківом та кута огинання канатом натяжного шківа – для канатної дороги традиційного типу. Для визначення необхідної потужності приводу канатної дороги із самохідними вагонами методом силового аналізу враховано вплив ваги індивідуального приводу самохідного вагона, а також фактичний кут підйому самохідного вагона відносно горизонту. Для канатних доріг традиційного типу використано методику обходу за контуром, яка враховує коефіцієнт зчеплення каната з натяжним шківом, а також кут огинання канатом натяжного шківа. **Результати.** Отримано залежності необхідної потужності приводу від проєктних параметрів канатної дороги з урахуванням нових факторів впливу. Вибір конкретної методики розрахунку необхідної потужності обґрунтовано відповідно до обраного типу дороги та вихідних даних. Отримані результати можна доповнити шляхом проведення додаткових розрахунків за формулами, наведеними в цій роботі. Представлені алгоритми з визначення характеристик канатної дороги за уточненою методикою дозволяють на рівні програмування складати програмне забезпечення для точного розрахунку значення необхідної потужності приводу. **Наукова новизна.** Уточнено залежності необхідної потужності приводу від характеристик канатної дороги шляхом врахування додаткових факторів, що дозволило більш точно оцінити їх вплив на остаточний результат. **Практична значимість.** Результати цієї роботи можуть бути використані під час проєктування енергоефективних канатних доріг, для яких електродвигун підбирають за уточненою методикою, що враховує більшу кількість факторів впливу на необхідну потужність приводу.

**Ключові слова:** канатна дорога; тяговий розрахунок; силовий розрахунок; силові параметри; енергоефективність

## Вступ

Канатні дороги широко використовують для перевезення пасажирів і вантажу. Також вони відомі високими показниками рівня безпеки, швидкості перевезень, екологічності, енергоефективності [8, 13], низькими витратами на забудову та обслуговування відносно інших видів транспорту.

Канатні дороги можуть належати до машин дискретного або безперервного транспорту. Залежно від технічного завдання на стадії планування канатна дорога може бути взяти такого типу:

– із самохідними вагонами (децентралізована тяга);

– одно- або двоканатною, із маятниковим або коловим рухом вагонів (централізована канатна тяга).

Канатну дорогу із самохідними вагонами обладнують індивідуальним приводом на кожній одиниці рухомого складу. Конструкція канатної дороги такого типу передбачає використання несного каната.

Одноканатні дороги мають лише один вид каната – тяговий, до якого жорстко кріплять вагони, які рухаються за заданою трасою між кінцевими точками.

Двоканатні дороги поєднують два види канатів: несні канати, по яких котяться ходові колеса вагонів, і тяговий канат, за допомогою якого відбувається рух вагонів.

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Одним зі шляхів підвищення енергоефективності канатних доріг є уточнення методики проектного розрахунку тягових канатів [4]. Також важливо для проектного розрахунку канатної дороги вибирати канати відповідно до заданих (проектних) навантажень та відповідних коефіцієнтів запасу міцності до умов використання. Аналогічний результат можна очікувати в разі підвищення точності розрахунку інших елементів канатної дороги.

### Мета

Основною метою цієї роботи є уточнення методики та розробка алгоритму визначення характеристик канатної дороги шляхом врахування ваги індивідуального приводу та фактичного кута підйому вагона відносно горизонту – для самохідного вагона і впливу коефіцієнта зчеплення каната з натяжним шківом та кута огинання канатом натяжного шківа – для канатної дороги традиційного типу.

Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

- аналіз наявних методик визначення характеристик канатної дороги для виявлення факторів, які мають вплив на точність результатів розрахунків, але не були враховані;
- уточнення формул для визначення окремих характеристик канатної дороги шляхом врахування виявлених факторів;
- порівняння результатів розрахунків за відомою методикою та уточненою для встановлення суттєвості впливу факторів, які не було враховано;
- розробка алгоритму визначення характеристик канатної дороги за уточненою методикою для встановлення чіткої послідовності дій у разі виконання розрахунків за різних сполучень вихідних даних.

У роботі розглядаємо та порівнюємо методику визначення характеристик канатної дороги із самохідними вагонами та двоканатної дороги з коловим рухом (далі – традиційного типу).

### Методика

*Наявні методики розрахунку необхідної потужності приводу канатних доріг бувають:*

- 1) силового аналізу [5];
- 2) обходу за контуром [4];
- 3) інші.

Вибір конкретної методики розрахунку необхідної потужності обґрунтовують, виходячи з обраного типу дороги та вихідних даних. Наприклад, для канатних доріг із самохідними вагонами варто визначати необхідну потужність приводу за методом силового аналізу, а для канатних доріг традиційного типу – за методом обходу за контуром.

Вихідні дані для проектування канатної дороги визначають за факторами, що враховують різні аспекти – від географічних умов, рельєфу місцевості, пасажиропотоків до технічних вимог та економічної ефективності. До них можуть належати:

- відстань між кінцевими точками (станціями), виміряна по горизонталі;
- перепад висот між кінцевими точками;
- схема рельєфу місцевості;
- необхідна продуктивність (пропускна здатність);
- необхідний інтервал руху вагонів в одиницях часу (для пасажирських доріг) або довжини.

За цими даними визначають характеристики канатної дороги:

- фактичну продуктивність (пропускну здатність);
- схему профілю дороги (із розставленням опор);
- довжину та перепади висот прогонів;
- фактичний інтервал руху вагонів в одиницях часу (для пасажирських доріг) або довжини;
- швидкість руху вагонів;
- місткість вагонів;
- потужність приводу;
- інші характеристики (залежно від особливостей конструкції та використання дороги).

*Аналіз методики силового аналізу [5] для канатних доріг із самохідними вагонами показав, що під час розрахунку не враховано такі фактори:*

- фактична вага індивідуального приводу самохідного вагона;
- фактичний кут підйому самохідного вагона відносно горизонту.

Під час аналізу методики обходу за контуром [4] для канатних доріг традиційного типу з'ясовано, що до розрахунку не взято такі фактори:

## МАШИНОБУДУВАННЯ

– коефіцієнт зчеплення каната з натяжним шківом;

– кут огинання канатом натяжного шківа.

Розглянемо, як буде впливати врахування цих факторів, складемо уточнені методики розрахунків для обох типів доріг та порівняємо результати.

*Силовий розрахунок приводу самохідного вагона.* У зв'язку з конструктивною аналогічністю та самохідним принципом руху методика визначення сил опору руху самохідного вагона ґрунтується на формулах визначення сил опору механізму пересування вантажного візка козлового крана [5] за умови врахування особливостей шляху – несний канат замість рейок.

Силовий розрахунок необхідної потужності приводу самохідного вагона розглянуто для випадку, коли самохідний вагон рухається на підйом (рис. 1), а вітрове навантаження направлене перпендикулярно руху вагона.

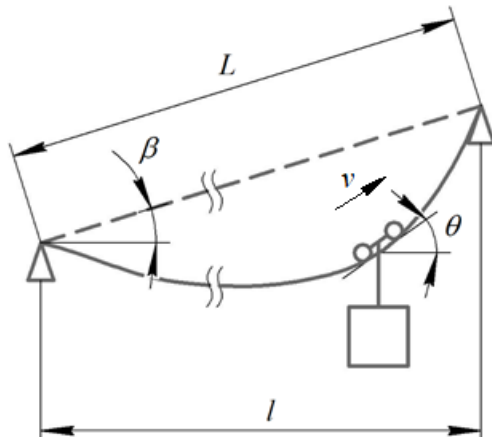


Рис. 1. Схема руху самохідного вагона на підйом

Fig. 1. Scheme of movement of a self-propelled car on an ascent

Необхідну потужність приводу самохідного вагона визначаємо за формулою:

$$P = \frac{Wv}{\eta}, \quad (1)$$

де  $W$  – загальний опір пересуванню самохідного вагона;  $v$  – швидкість руху самохідного вагона;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії індивідуального приводу.

Загальний опір пересуванню самохідного вагона визначаємо за формулою

$$W = W_{\text{тр}} + W_{\text{вн}} + W_{\text{п}}, \quad (2)$$

де  $W_{\text{тр}}$  – опір руху від сил тертя;  $W_{\text{вн}}$  – опір руху від вітрового навантаження;  $W_{\text{п}}$  – опір руху на підйом.

Зважаючи на те, що фактичний кут підйому  $\theta$  вагона відносно горизонту є суттєвим, до формули для визначення опору руху від сил тертя вводим множник  $\cos \theta$ :

$$W_{\text{тр}} = (G_{\text{вж}} + G_{\text{в}} + G_{\text{пр}}) w \cos \theta, \quad (3)$$

де  $G_{\text{вж}}$  – номінальна вага вантажу,  $G_{\text{вж}} = m_{\text{вж}} g$ ,  $m_{\text{вж}}$  – номінальна маса вантажу;  $G_{\text{в}}$  – вага самохідного вагона,  $G_{\text{в}} = m_{\text{в}} g$ ,  $m_{\text{в}}$  – маса самохідного вагона;  $G_{\text{пр}}$  – вага приводу самохідного вагона,  $G_{\text{пр}} = m_{\text{пр}} g$ ,  $m_{\text{пр}}$  – маса приводу самохідного вагона;  $w$  – коефіцієнт опору руху [5].

У роботі [5] масу приводу самохідного вагона взято рівною 20 % від маси самого вагона. Уточнена методика передбачає врахування фактичної маси приводу, яку визначають за алгоритмом, блок-схему якого подано далі.

Несний канат при за великої довжини та малої жорсткості на згинання умовно вважають абсолютно гнучким і для розрахунку використовують положення теорії (механіки) гнучкої нитки [6].

За методикою силового аналізу отримана формула з визначення розривного зусилля несного каната:

$$F_0 = 1,25 \cdot 0,045 \frac{(m_{\text{вж}} + m_{\text{в}} + m_{\text{пр}}) g}{u} \times \sqrt{\frac{1000 Q n_{\text{д}} n_{\text{г}}}{m_{\text{вж}}}} z_{\text{н}}, \quad (4)$$

де  $u$  – загальна кількість коліс візка самохідного вагона;  $Q$  – годинна продуктивність;  $n_{\text{д}}$  – кількість робочих днів на рік;  $n_{\text{г}}$  – кількість робочих годин на добу;  $z_{\text{н}}$  – коефіцієнт запасу міцності несучого каната [6].

За отриманим розривним зусиллям згідно з формулою (4) та каталогом несних канатів [10] і ISO 17893:2004 [11] вибираємо несний канат за умови, що межа міцності каната на ро-

## МАШИНОБУДУВАННЯ

зрив (за каталогом) має бути менша за розривне зусилля.

Із використанням відомих формул для розрахунку гнучких ниток [6] та після перетворень тангенс фактичного кута нахилу підйому самохідного вагона становитиме:

$$\operatorname{tg}\theta = \operatorname{tg}\beta + \frac{4\chi(q_n L + m_{\text{вж}} + m_{\text{в}} + m_{\text{пр}})}{q_n (L \cos\beta)^2}, \quad (5)$$

де  $q_n$  – погонна маса несного каната [10];  $\beta$  – кут нахилу хорди прогону;  $L$  – довжина хорди прогону;  $\chi$  – стріла провисання, для несних канатів  $\chi = (0,03 \dots 0,05)L$  [6].

Опір пересуванню самохідного вагона канатної дороги від вітрового навантаження визначаємо за формулою:

$$W_{\text{вн}} = W_{\text{вж}} + W_{\text{в}}, \quad (6)$$

де  $W_{\text{вж}}$  – сила тиску вітру на самохідний вагон;  $W_{\text{в}}$  – сила тиску вітру на візок самохідного вагона, з огляду на незначні габарити візка порівняно з габаритами вагона можна вважати, що  $W_{\text{в}} = 0$ .

Сила тиску вітру на самохідний вагон канатної дороги [5] становитиме:

$$W_{\text{вж}} = F_{\text{вж}} q k c n, \quad (7)$$

де  $F_{\text{вж}}$  – розрахункова площа самохідного вагона;  $q$  – динамічний тиск вітру;  $k$  – коефіцієнт, який враховує зміну динамічного тиску вітру по висоті;  $c$  – коефіцієнт аеродинамічної сили;  $n$  – коефіцієнт перевантаження.

Опір руху на підйом знаходимо за формулою:

$$W_{\text{п}} = (G_{\text{вж}} + G_{\text{в}} + G_{\text{пр}}) \sin\theta. \quad (8)$$

Підставляючи формули (3), (6), (8) у формулу (1), отримуємо залежність:

$$W = (G_{\text{вж}} + G_{\text{в}} + G_{\text{пр}}) w \cos\theta + (G_{\text{вж}} + G_{\text{в}} + G_{\text{пр}}) \times \sin\theta + F_{\text{в}} q k c n = (G_{\text{вж}} + G_{\text{в}} + G_{\text{пр}}) \times (w \cos\theta + \sin\theta) + F_{\text{в}} q k c n. \quad (9)$$

Після виконання математичних перетворень отримуємо вираз:

$$W = g \cos\theta (m_{\text{вж}} + m_{\text{в}} + m_{\text{пр}}) (w + \operatorname{tg}\theta) + F_{\text{в}} q k c n. \quad (10)$$

Остаточно необхідна потужність приводу самохідного вагона становитиме:

$$P = [g \cos\theta (m_{\text{вж}} + m_{\text{в}} + m_{\text{пр}}) (w + \operatorname{tg}\theta) + F_{\text{в}} q k c n] \times \frac{1}{\eta} v. \quad (11)$$

*Тяговий розрахунок канатної дороги традиційного типу.* Розрахунок тягових зусиль двоканатної дороги з коловим рухом (традиційного типу) виконують із використанням методу обходу за контуром [4]. Основний принцип методу полягає у виявленні характерних точок траси, у яких відбувається зміна натягу каната.

Подальші розрахунки для канатних доріг традиційного типу будемо проводити за схемою, зображеною на рис. 2.

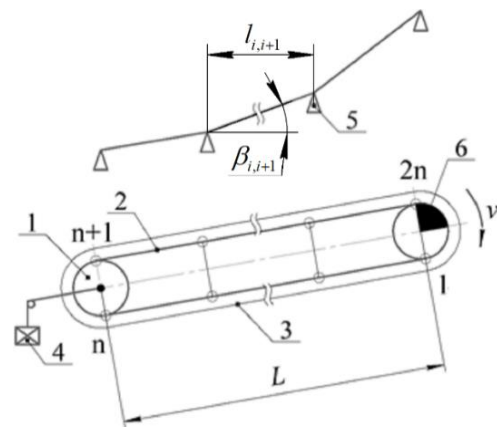


Рис. 2. Схема двоканатної дороги з кільцевим рухом:

- 1 – натяжний шків; 2 – тяговий канат;
- 3 – несучий канат; 4 – натяжний пристрій;
- 5 – опора; 6 – привідний шків

Fig. 2. Scheme of a two-channel road with circular motion:

- 1 – tension pulley; 2 – traction rope;
- 3 – carrier rope; 4 – tensioning device;
- 5 – support; 6 – drive pulley

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Необхідна потужність приводу канатної дороги традиційного типу становитиме:

$$P = \frac{F_0 v}{\eta}, \quad (12)$$

де  $F_0$  – окружне зусилля;  $v$  – швидкість руху вагонів;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії приводу.

При цьому опір переміщенню каната між точкою  $i$  та наступною  $i+1$  визначаємо за формулою:

$$W_{i,i+1} = ql_{i,i+1} (w \cos \beta_{i,i+1} \pm \sin \beta_{i,i+1}), \quad (13)$$

де  $q = \left( q_T + \frac{m_B + m_{ВЖ}}{\lambda} \right) g$  – зведене погонне навантаження [5];  $q_T$  – питома маса 1 м тягового каната;  $l_{i,i+1}$  – довжина хорди траси між  $i$ -ю та  $i+1$  точками прогону;  $\beta_{i,i+1}$  – кут нахилу хорди між  $i$ -ю та  $i+1$  точками прогону; якщо  $i = n+1, 2n-1$ , то для розрахунку ділянки профілю на підйом беремо знак «+»; якщо  $i = 1, n$ , то для розрахунку ділянки профілю на спуск беремо знак «-»;  $n$  – кількість точок траси (в одну сторону), у яких відбувається зміна натягу каната (рис. 2).

Використовуючи метод обходу за контуром, визначимо натяг каната в точці  $n$  та наступній  $n+1$  точках, виражаючи їх через натяг  $T_1$ :

$$T_n = T_1 + \sum_{i=1}^n W_i; \quad (14)$$

$$T_{n+1} = kT_n, \quad (15)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що враховує збільшення натягу каната під час огинання ним натяжного шківів;  $k=1,05$  за кута огинання  $\alpha=180^\circ$ , що визначено відповідно до коефіцієнта, що враховує збільшення натягу стрічки під час огинання нею натяжного барабана стрічкового конвеєра [3].

До уточнення методики втрати енергії на огинання канатом натяжного шківів не враховували.

Натяг каната в точці  $2n$  визначаємо за формулою:

$$T_{2n} = T_{n+1} + \sum_{i=n+1}^{2n} W_i. \quad (16)$$

Колове зусилля приводу канатної дороги традиційного типу становитиме:

$$F_0 = T_{2n} - T_1. \quad (17)$$

Можливість реалізації тяги канатної дороги забезпечується в разі дотримання умови:

$$T_{2n} \leq T_1 \exp(f\alpha), \quad (18)$$

де  $f$  – коефіцієнт зчеплення каната з привідним шківом [3];  $\alpha$  – кут огинання канатом привідного шківів.

Розривне зусилля в канаті знаходимо з виразу:

$$F_{\text{розр}} = T_{2n} z_T, \quad (19)$$

де  $z_T$  – коефіцієнт запасу міцності тягового каната [7].

За отриманим розривним зусиллям згідно з формулою (19) та каталогом тягових канатів [9] і EN 12385-4:2002 [12] вибираємо тяговий канат за умови, що межа міцності каната на розрив (за каталогом) має бути менша за розривне зусилля.

Підставляючи формули (15), (14) у формулу (16) та розглядаючи умову граничного стану натягу в точці  $2n$  за формулою (17), після спрощень отримаємо рівняння:

$$kT_1 + k \sum_{i=1}^n W_i + \sum_{i=n+1}^{2n} W_i = T_1 \exp(f\alpha). \quad (20)$$

Із рівняння (20) визначаємо натяг каната в точці 1 та після спрощення отримаємо формулу:

$$T_1 = \frac{k \sum_{i=1}^n W_i + \sum_{i=n+1}^{2n} W_i}{\exp(f\alpha) - k}. \quad (21)$$

Після підстановки формул (18), (21) у формулу (17) та виконання математичних перетворень отримаємо:

$$F_0 = \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} \left( k \sum_{i=1}^n W_i + \sum_{i=n+1}^{2n} W_i \right). \quad (22)$$

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Правило визначення знака кута нахилу хорди прогону ( $\beta$ ):

1) під час руху на підйом значення кута нахилу хорди прогону вважати додатним (рис. 3, а);

2) під час руху на спуск значення кута нахилу хорди прогону вважати від'ємним (рис. 3, б).

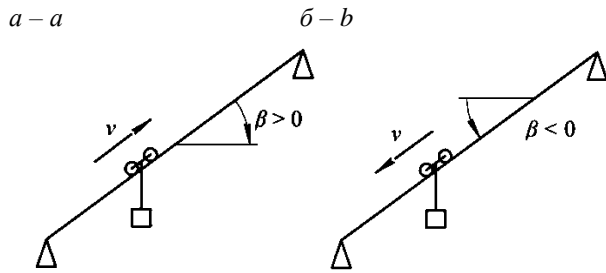


Рис. 3. Схема для визначення знака кута нахилу хорди прогону:

$a$  – під час підйому;  $b$  – під час спуску

Fig. 3. Scheme for determining the angle sign of inclination of the runway chord:

$a$  – during ascent;  $b$  – during descent

Сумарний опір руху під час підйому на ділянці профілю між точками  $n+1$  та  $2n$ :

$$W_{n+1,2n} = qL_i (w \cos \beta_i - \sin(-\beta_i)) = qL_i (w \cos \beta_i + \sin \beta_i), \quad (23)$$

де  $i = \overline{n+1 \dots 2n}$ ;  $L_i$  – довжина траси  $i$ -го прогону;  $\beta$  – кут нахилу хорди  $i$ -го прогону.

Після математичних перетворень та спрощення маємо:

$$W_{n+1,2n} = qL_i (w + tg\beta_i). \quad (24)$$

Сумарний опір руху під час спуску на ділянці профілю між точками 1 та  $n$ :

$$\sum_{i=1}^n W_i = q \sum_{i=1}^{n-1} l_{i,i+1} (w + tg\beta_{i,i+1}), \quad (25)$$

де  $i = \overline{1 \dots n}$ .

Величини опорів руху під час підйому на ділянці профілю між точками та :

$$W_{i,i+1} = ql_{i,i+1} (w + tg\beta_{i,i+1}), \quad (26)$$

де  $i = \overline{n+1 \dots 2n}$ .

Сумарний опір руху під час підйому на ділянці профілю між точками  $n+1$  та  $2n$ :

$$\sum_{i=n+1}^{2n} W = q \sum_{i=n+1}^{2n-1} l_{i,i+1} (w + tg\beta_{i,i+1}) = q \left( \sum_{i=n+1}^{2n-1} l_{i,i+1} w + \sum_{i=n+1}^{2n-1} h_{i,i+1} \right), \quad (27)$$

де  $h_{i,i+1}$  – перевищення в прогоні між точками  $i$ ,  $i+1$ .

Після спрощення отримуємо вираз для визначення сумарного опору руху як на підйом, так і на спуск:

$$\sum_{i=n+1}^{2n} W = \sum_{i=1}^n W = q[wL + H], \quad (28)$$

де  $L = \sum_{i=1}^{n-1} l_{i,i+1} = \sum_{i=n+1}^{2n-1} l_{i,i+1}$ ;  $H = \sum_{i=1}^{n-1} h_{i,i+1} = \sum_{i=n+1}^{2n-1} h_{i,i+1}$ .

Після підстановки формул (15), (27) у формулу (16) математичних перетворень та спрощень отримуємо:

$$T_{2n} = g \left( \frac{m_{вж}}{\lambda} + \frac{m_{вар}}{\lambda} + q_T \right) L \frac{e^{f\alpha}}{e^{f\alpha} - k} \times (1+k)[w + tg\beta]. \quad (29)$$

Після підстановки формули (28) у формулу (22) отримуємо:

$$F_O = [kq(wL + H) + q(wL + H)] \times \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k}. \quad (30)$$

Після перетворень колове зусилля канатної дороги традиційної конструкції становитиме:

$$F_O = gL \left( \frac{m_{вж}}{\lambda} + \frac{m_{вар}}{\lambda} + q_T \right) \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} \times (1+k)[w + tg\beta]. \quad (31)$$

Остаточно необхідна потужність приводу канатної дороги традиційного типу становитиме:

$$P = \frac{1}{\eta} gLv \left( \frac{m_{вж}}{\lambda} + \frac{m_{вар}}{\lambda} + q_T \right) \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} \times (1+k)[w + tg\beta]. \quad (32)$$

## МАШИНОБУДУВАННЯ

Алгоритм визначення характеристик канатної дороги за уточненою методикою. Для встановлення чіткої послідовності дій під час виконання розрахунків розробляємо алгоритм, що дозволяє формалізувати послідовність виконання розрахунків за різних сполучень вихідних даних. Для вибору електродвигуна приводу самохідного вагона необхідної потужності за уточненим методом силового аналізу розроблено блок-схему, яку зображено на рис. 4.

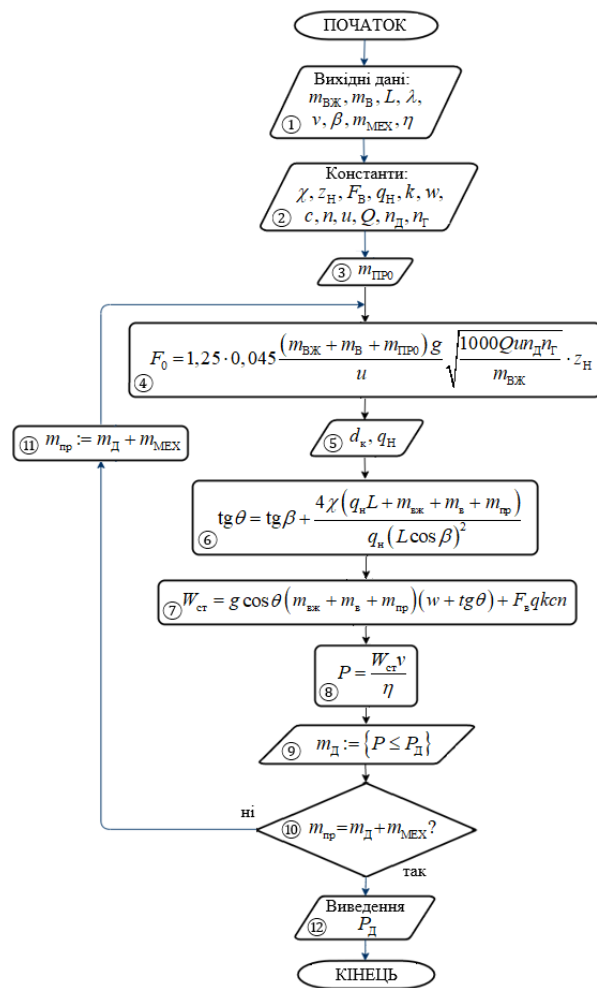


Рис. 4. Блок-схема алгоритму вибору електродвигуна самохідного вагона з необхідною потужністю приводу

Fig. 4. Block diagram of the algorithm for selecting a self-propelled car electric motor with the required drive power

Алгоритм складається з основних операцій:

- ① вводимо вихідні дані;
- ② вводимо значення констант;

③ беремо орієнтовне значення маси приводу;

④ розраховуємо розривне зусилля несного каната;

⑤ за каталогом [10] та ISO 17893:2004 [11] визначаємося діаметр та погонну масу несного каната;

⑥ визначаємо тангенс фактичного кута нахилу підйому самохідного вагона за формулою (5);

⑦ визначаємо загальний статичний опір пересуванню за формулою (10);

⑧ визначаємо необхідну потужність електродвигуна за формулою (11);

⑨ орієнтовно підбираємо електродвигун та визначаємо масу електродвигуна за каталогами електродвигунів;

⑩ перевіряємо умову, чи збігається значення маси приводу з попередньо взято (п. 3);

⑪ якщо у п. 10 – ні, беремо орієнтовно нову масу приводу, яка відповідає обраній із каталогу, та повторюємо розрахунок, починаючи з п. 4.;

⑫ із каталогу електродвигунів [2] беремо такий електродвигун, який відповідає необхідним заданим параметрам та має потужність не меншу за розраховану.

Для вибору електродвигуна приводу канатної дороги традиційного типу необхідною потужністю за уточненим методом обходу за контуром розроблено блок-схему, яку зображено на рис. 5.

Алгоритм складається з основних позицій:

① вводимо вихідні дані;

② вводимо значення констант;

③ беремо орієнтовне значення питомої ваги 1 м тягового каната;

④ розраховуємо натяг каната в точці за формулою (29);

⑤ визначаємо розривне зусилля тягового каната за формулою (19);

⑥ за каталогом тягових канатів [12] та EN 12385-4:2002 [9] вибираємо тяговий канат;

⑦ перевіряємо умову збігу значень орієнтовної питомої ваги 1 м тягового каната (п. 3) із взятим (п. 6);

⑧ якщо у п. 7 значення не збігається, беремо отримане значення питомої ваги 1 м тягового каната з п. 6 та повторюємо розрахунок з п. 4.;

⑨ якщо у п. 7 значення збігається, визначаємо колове зусилля за формулою (31);

## МАШИНОБУДУВАННЯ

⑩ визначаємо необхідну потужність електродвигуна за формулою (32);

⑪ із каталогу електродвигунів [2] обираємо електродвигун, який відповідає необхідним заданим параметрам та має потужність не меншу за розраховану;

⑫ виводимо отриманий результат.

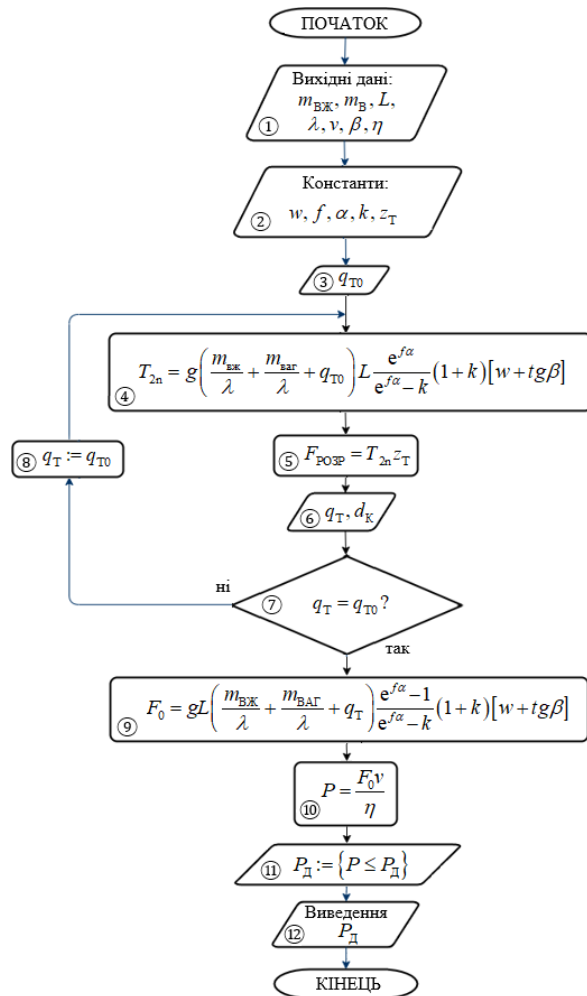


Рис. 5. Блок-схема алгоритму вибору електродвигуна канатної дороги традиційного типу з необхідною потужністю приводу

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for selecting a traditional type cableway electric motor with the required drive power

### Результати

Для встановлення суттєвості впливу факторів, які не було враховано, виконаємо порівняння результатів розрахунків за відомою методикою та уточненою.

Було проведено низку досліджень, у яких визначено необхідну потужність приводу для канатних доріг традиційної конструкції та із самохідними вагонами, розглянуто понад 200 розрахункових випадків для кожного типу, що дозволяє нам детально проаналізувати отримані результати.

Розрахунки проведено за такими базовими характеристиками (однакові для доріг обох типів):

- довжина хорди прогону = 1 000 м;
- інтервал руху вагонів = 100 м;
- швидкість руху вагонів = 3 м/с;
- кількість вагонів в одному напрямку руху = 10 од.;
- комбінації мас вантажу і вагонів наведено в табл. 1;
- кут огинання канатом привідного шківів дороги традиційного типу = 180°;
- коефіцієнт, що враховує збільшення натягу тягового каната під час огинання ним на прямого шківів = 1,05;
- коефіцієнт запасу міцності тягового каната = 4 [7];
- коефіцієнт запасу міцності несного каната = 3,15 [7];
- кут нахилу хорди прогону змінний у діапазоні від 0 до 20°;
- коефіцієнт опору руху = 0,0065 [5];
- стріла провисання несного каната = 40 м [8];

Таблиця 1

### Комбінації мас вантажу та вагонів

Table 1

### Combinations of cargo and wagon weights

Типорозмір вагона	m <sub>вж</sub> , кг	m <sub>ваг</sub> , кг
№1	700	483
№2	882	508
№3	1 120	537
№4	1 400	567
№5	1 750	600

- розрахункова площа вагона = 1,6 м<sup>2</sup> (за 3D моделлю вагона у SolidWorks);
- динамічний тиск вітру = 250 Па [5];



## МАШИНОБУДУВАННЯ

- коефіцієнт, який враховує зміну динамічного тиску вітру по висоті = 1,4 [5];
- коефіцієнт аеродинамічної сили = 1,2 [5];
- коефіцієнт перевантаження = 1.

Результати розрахунків зведені у вигляді графіків. Графік залежності необхідної потужності двигуна самохідного вагона від кута нахилу хорди прогону (для комбінації мас типорозміру вагона № 3) зображено на рис. 6. Лінія 1 показує результати розрахунку за відомою методикою; лінія 2 – результати за уточненою методикою.

Різницю результату розрахунку за методами можна розрахувати за формулою:

$$\Delta = \frac{|P_2 - P_1|}{P_1} \cdot 100\%, \quad (33)$$

де – значення необхідної потужності приводу за відомою методикою; – значення необхідної потужності приводу за уточненою методикою.

З графіка на рис. 6 видно, що значення необхідної потужності приводу двигуна самохідного вагона за уточненою методикою значно вище, ніж за результатами розрахунку за відомою методикою.

Максимальне значення різниці розрахунку складає 462 %, мінімальне 91 %, середнє 150,5 %.

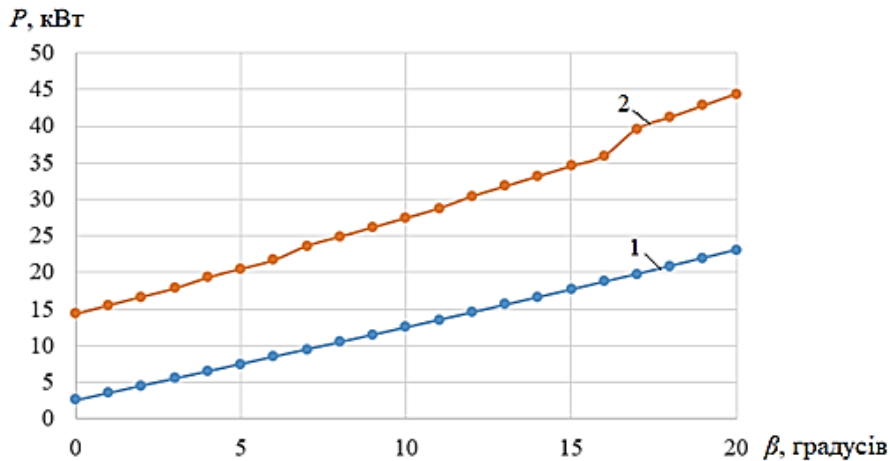


Рис. 6. Графік залежності необхідної потужності двигуна самохідного вагона від кута нахилу хорди прогону (для комбінації мас типорозміру вагонів 3 (табл. 1): 1 – розрахунок за відомою методикою; 2 – за уточненою методикою

Fig. 6. Graph of the dependence of the required engine power of a self-propelled railcar on the angle of inclination of the chord of the run (for a combination of masses of railcar size 3 (Table 1): 1 – calculation by the known method; 2 – by the revised method

Як бачимо, що уточнення методики розрахунку необхідної потужності приводу двигуна самохідного вагона значною мірою впливає на результат завдяки врахуванню таких факторів, як фактична вага індивідуального приводу самохідного вагона та фактичний кут підйому самохідного вагона відносно горизонту.

На рис. 7 показано графік залежності необхідної потужності приводу двигуна канатної

дороги традиційної конструкції від кута нахилу хорди прогону (для комбінації мас типорозміру вагонів 3 (табл. 1)).

Із графіка на рис. 7 видно, що зі збільшенням кута нахилу хорди прогону значення необхідної потужності приводу двигуна канатної дороги традиційної конструкції за уточненою методикою помірно зростають порівняно з результатами розрахунку за відомою методикою.

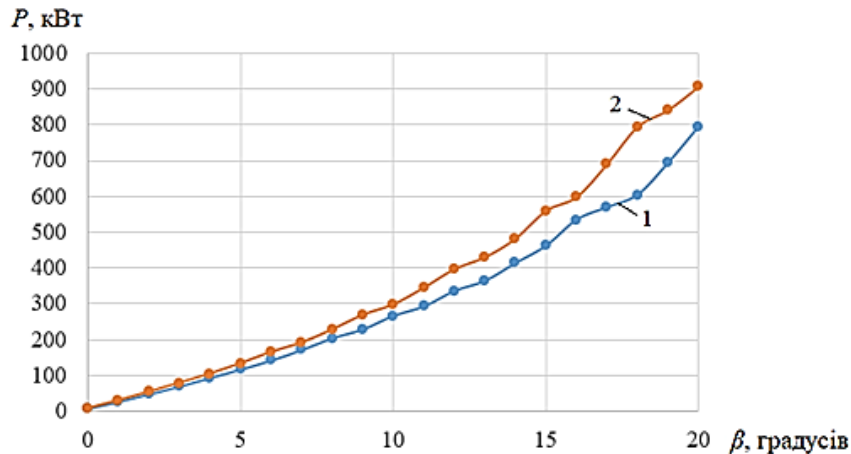


Рис. 7. Графік залежності необхідної потужності приводу двигуна канатної дороги традиційної конструкції від кута нахилу хорди прогону (для комбінації мас типорозміру вагонів 3 (табл. 1):  
1 – розрахунок за відомою методикою; 2 – за уточненою методикою

Fig. 7. Graph of the dependence of the required drive power of the motor of a conventional cableway on the angle of inclination of the chord of the run (for a combination of masses of car size 3 (Table 1):  
1 – calculation by the known method; 2 – by the revised method

Максимальне значення різниці розрахунку складає 23,9 %, мінімальне 10,55 %, середнє 13,7 %.

Таким чином, що уточнення методики розрахунку необхідної потужності приводу двигуна канатної дороги традиційної конструкції значною мірою впливає на результат у зв'язку з врахуванням таких факторів, як коефіцієнт зчеплення каната з натяжним шківом та кут огинання канатом натяжного шківа.

#### Наукова новизна та практична значимість

Уточнено залежність необхідної потужності приводу від характеристик канатної дороги з урахуванням додаткових факторів, що дозволило точніше оцінити їхній вплив на остаточний результат.

Аналіз наявних методик показав необхідність врахування більшої кількості факторів для розрахунку потрібної потужності приводу.

Результати цієї роботи можуть бути використані під час проектування енергоефективних канатних доріг, де електродвигун підбирають за уточненою методикою, що враховує більшу кількість факторів, які впливають на необхідну потужність приводу.

#### Висновки

Використання уточненої методики розрахунку необхідної потужності приводу двигуна канатних доріг дає можливість більш коректно обирати двигун, що забезпечить кращі умови роботи приводу канатної дороги. Результати розрахунку показали високий вплив факторів, які раніше не враховували, на необхідну потужність приводу двигуна канатної дороги.

Такими факторами для канатної дороги із самохідними вагонами є:

- фактична вага індивідуального приводу самохідного вагона;
- фактичний кут підйому самохідного вагона відносно горизонту.

Для канатних доріг традиційного типу враховано такі фактори:

- коефіцієнт зчеплення каната з натяжним шківом;
- кут огинання канатом натяжного шківа.

Для встановлення чіткої послідовності дій під час виконання розрахунків складено алгоритм, що дозволяє формалізувати послідовність виконання розрахунків за різних сполучень вихідних даних.

Отримані результати можуть бути використані під час проектування та модернізації канатних доріг традиційної конструкції та із само-

хідними вагонами. Також нова методика може бути корисною для розрахунків енергоефективних параметрів канатних доріг.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 12385-4:2017 Канати сталеві дротяні. Безпека. Частина 4. Канати подвійної звивки для загального підйомного застосування (EN 12385-4:2002 + A1:2008, IDT). На заміну ДСТУ EN 12385-4:2014 [Чинний від 01-01-2019]. Вид. офіц. Київ : Технічний комітет стандартизації «Сталеві дротяні канати» (ТК 100), 2017. 28 с.
2. Каталог електродвигунів АИР. URL: [https://air.com.ua/uk/katalog\\_elektrodvyguniv\\_air/](https://air.com.ua/uk/katalog_elektrodvyguniv_air/)
3. Куроп'ятник О. С. Параметрична оптимізація стрічкових конвеєрів за критерієм енергоефективності. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 3 (93). С. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/242036>
4. Куроп'ятник О. С. Обґрунтування шляхів підвищення енергоефективності канатних доріг. *Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences* (Radom, 27–28 Dec., 2017). Radom. P. 159–162.
5. Куроп'ятник О. С., Краснощок О. Л. Порівняльний аналіз енергоефективності канатних доріг за питомою потужністю приводу. *Матеріали доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції: Логістика і транспортна безпека: проблеми та перспективи розвитку в контексті аналізу сучасних викликів і загроз* (Дніпро, 09 лист. 2023 р.). Дніпро: «Середняк Т. К.», 2023. С. 235–243.
6. Матвеев Е. М., Тисовський Л. О., Рудько І. М. Теоретичні та експериментальні дослідження силових і геометричних параметрів несучих канатів багатопрольотних транспортних установок. *Вісник Львівського державного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. 2006. № 10. С. 438–442.
7. НПАОП 60.2-1.02-14. Правила будови і безпечної експлуатації пасажирських підвісних канатних доріг. На заміну НПАОП 60.22-1.01-74 [Чинний від 11-03-2014]. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2014. 152 с.
8. Ракша С. В., Куроп'ятник О. С., Краснощок О. Л. Обґрунтування показників енергоефективності канатних доріг. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 6 (84). С. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195601>
9. Сологуб Б. В., Ланець О. В., Данило Я. Я. Аналіз навантажень при роботі спареної канатної дороги з переважувальним механізмом. *Підйомно-транспортна техніка*. 2018. № 3 (59). С. 4–14.
10. Full Lock Coil, Z-Lock. A powerful, high strength rope for deep shaft mining applications. *ArcelorMittal*. URL: [https://barsandrods.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our\\_ropes/mining\\_ropes/full\\_lock\\_coil\\_z-lock/EN](https://barsandrods.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our_ropes/mining_ropes/full_lock_coil_z-lock/EN)
11. ISO 17893:2004/Amd 1:2010 Steel wire ropes - Vocabulary, designation and classification. Full Lock International Standard confirmed, 2010. 6 p.
12. NCR6. The stable steel rope for aerial transportation and open pit mining. *ArcelorMittal*. URL: [https://barsandrods.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our\\_ropes/mining\\_ropes/4766/EN](https://barsandrods.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our_ropes/mining_ropes/4766/EN)
13. Szlosarek R., Yan C., Kröger M., Nußbaumer C. Energy efficiency of ropeways: a model-based analysis. *Public Transport*. 2019. Vol. 11. P. 617–635 DOI: <https://doi.org/10.1007/s12469-019-00212-1>

O. S. KUROIATNYK<sup>1\*</sup>, O. L. KRASNOSHCHOK<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 674 26 44, e-mail [kuropyatnick@gmail.com](mailto:kuropyatnick@gmail.com), ORCID 0000-0001-5581-3883

<sup>2\*</sup>Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (098) 706 27 43, e-mail [akrasnoshchok1996@gmail.com](mailto:akrasnoshchok1996@gmail.com), ORCID 0000-0002-0140-5179

## Clarification of the Methodology for Determining the Characteristics of Cableways

**Purpose.** The aim of this study is to clarify the methodology and develop an algorithm for determining the characteristics of cableways of traditional design and with self-propelled cars, taking into account new factors of influence. **Methodology.** An analysis of existing methods for determining the characteristics of cableways of various

designs was carried out. This goal was achieved by taking into account the weight of the individual drive and the actual angle of the car's elevation relative to the horizon for a self-propelled car; the influence of the coefficient of adhesion of the rope to the tension pulley and the angle of envelopment of the rope around the tension pulley for a traditional cableway. To determine the required drive power of a cableway with self-propelled cars, the influence of the weight of an individual self-propelled car drive and the actual angle of the self-propelled car relative to the horizon are taken into account by the method of force analysis. For traditional cableways, the contour traversal method is used, which takes into account the coefficient of adhesion of the rope to the tension pulley, as well as the angle of envelopment of the tension pulley by the rope. **Findings.** The dependencies of the required drive power on the design parameters of the cableway were obtained, taking into account new factors of influence. The choice of a specific methodology for calculating the required power is justified in accordance with the selected type of road and the initial data. The results obtained can be supplemented by performing additional calculations using the formulas given in this paper. The presented algorithms for determining the characteristics of a cableway using the refined methodology allow, at the programming level, to develop software for accurately calculating the value of the required drive power. **Originality.** The dependence of the required drive power on the characteristics of the cableway was clarified by taking into account additional factors, which made it possible to more accurately assess their impact on the final result. **Practical value.** The results of this work can be used in the design of energy-efficient cableways, for which the electric motor is selected according to a refined methodology that takes into account more factors affecting the required drive power.

*Keywords:* cableway; traction calculation; power calculation; power parameters; energy efficiency

## REFERENCES

1. *Kanaty stalevi drotiani. Bezpeka. Chastyna 4. Kanaty podviinoi zvyvykly dlia zahalnoho pidiomnoho zastosuvannya (EN 12385-4:2002 + A1:2008, IDT), 28 DSTU EN 12385-4:2017.* (2017). (in Ukrainian)
2. *Kataloh elektrodvyguniv AYR.* URL: [https://anp.com.ua/uk/katalog\\_elektrodvyguniv\\_air/](https://anp.com.ua/uk/katalog_elektrodvyguniv_air/) (in Ukrainian)
3. Kuropiatnyk, O. S. (2021). Parametric Optimization of Belt Conveyors by Energy Efficiency Criterion. *Science and Transport Progress*, 3(93), 50-58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/242036> (in Ukrainian)
4. Kuropiatnyk, O. S. (Dec. 2017). Justification of Ways to Improve the Energy Efficiency of Ropeways. In *Modern Methods, Innovations, and Experience of Practical Application in the Field of Technical Sciences* (pp. 159-162). Radom, Republic of Poland. (in Ukrainian)
5. Kuropiatnyk, O. S., & Krasnoshchok, O. L. (Nov., 2023). Comparative analysis of the energy efficiency of cableways by surface power density drive. In *Report materials the 2nd International scientific and practical conference: Logistics and transport security: issues and development prospects in the context of analyzing contemporary challenges and threats* (pp. 235-243). Dnipro: Serednyak T. K. (in Ukrainian)
6. Matveev, E. M., Tysovskiy, L. O., & Rudko, I. M. (2006). Theoretical and experimental researches of power and geometrical parameters of bearing cables of transport plant with many runs. *Bulletin of Lviv National Environmental University Agroengineering Research*, 10, 438-442. (in Ukrainian)
7. *Pravyla budovy i bezpechnoi ekspluatatsii pasazhyrskykh pidvisnykh kanatnykh dorih, 152 NPAOP 60.2-1.02-14.* (2014). (in Ukrainian)
8. Raksha, S. V., Kuropiatnyk, O. S., & Krasnoshchok, O. L. (2019). Justification of criteria for ropeways energy efficiency. *Science and Transport Progress*, 6(84), 60-71. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195601> (in English)
9. Sologub, B. V., Lanets, O. V., & Danylo, Ya. Ya. (2018). Analysis of Loads in the Operation of Paired Ropeways with a Transshipment Mechanism. *Hoisting and conveying equipment*, 3(59), 4-14. (in Ukrainian)
10. Full Lock Coil, Z-Lock. A powerful, high strength rope for deep shaft mining applications. *ArcelorMittal*. URL: [https://barsandros.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our\\_ropes/mining\\_ropes/full\\_lock\\_coil\\_z-lock/EN](https://barsandros.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our_ropes/mining_ropes/full_lock_coil_z-lock/EN) (in English)
11. *Steel wire ropes - Vocabulary, designation and classification, 6 ISO 17893:2004/Amd 1:2010.* (2010). (in English)
12. NCR6. The stable steel rope for aerial transportation and open pit mining. *ArcelorMittal*. URL: [https://barsandros.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our\\_ropes/mining\\_ropes/4766/EN](https://barsandros.arcelormittal.com/wiresolutions/wireropes/our_ropes/mining_ropes/4766/EN) (in English)
13. Szlosarek, R., Yan, C., Kröger, M., & Nußbaumer, C. (2019). Energy efficiency of ropeways: a model-based analysis. *Public Transport*, 11(3), 617-635. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12469-019-00212-1> (in English)

Надійшла до редколегії: 27.05.2024

Прийнята до друку: 30.09.2024