

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 625.57:621.311

С. В. РАКША^{1*}, О. С. КУРОП'ЯТНИК^{2*}, О. Л. КРАСНОЦОК^{3*}

^{1*}Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

^{2*}Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 674 26 44, ел. пошта kuropatnick@gmail.com, ORCID 0000-0001-5581-3883

^{3*}Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (098) 706 27 43, ел. пошта sasha96.08.20@email.ua, ORCID 0000-0002-0140-5179

ОБГРУНТУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КАНАТНИХ ДОРІГ

Мета. За основну мету статті ми ставимо формування та обґрунтування показників енергоефективності канатних доріг традиційної конструкції та доріг із самохідними вагонами на основі порівняння їх величин. Обґрунтування показників енергоефективності канатних доріг дозволяє в повному обсязі визначитися з напрямом подальших досліджень у сфері розвитку альтернативного виду міського транспорту. **Методика.** Для отримання вихідних даних проведено огляд світових напрямів розвитку канатних доріг. Запропоновано аналітичні формули для визначення показників енергоефективності, за якими виконано порівняння канатних доріг традиційної конструкції та доріг із самохідними вагонами. При цьому враховано вплив ступеня завантаженості й номінальної потужності на коефіцієнт корисної дії електродвигуна. З метою врахування розсіювання енергії в тяговому канаті через його пружні властивості було введено поняття коефіцієнта корисної дії тягового канату. **Результати.** Сформовано методіку підрахунку коефіцієнта корисної дії канатних доріг. Розроблено формули для визначення енергоефективності й оцінено вплив характеристик канатних доріг на їх розрахункові значення. Побудовано графіки залежності коефіцієнта корисної дії самохідної канатної дороги від номінальної потужності електродвигуна та коефіцієнта корисної дії від завантаженості приводу підвісної канатної дороги. Також порівняно загальні коефіцієнти корисної дії для канатних доріг із самохідними вагонами та для доріг традиційної конструкції. Наведені результати ґрунтуються на усереднених значеннях параметрів електродвигунів за умови їх різного завантаження. **Наукова новизна.** Автори вперше запропонували та обґрунтували показники енергоефективності, які дозволяють здійснювати порівняльний аналіз канатних доріг традиційної конструкції та доріг із самохідними вагонами. Визначили залежність цих показників від параметрів канатної дороги. **Практична значимість.** Результати проведеного порівняльного аналізу канатної дороги традиційної конструкції з дорогами, які містять самохідні вагони, за запропонованими показниками енергоефективності можуть бути використані для обґрунтування доцільності застосування певних видів канатних доріг з метою реалізації окремих транспортних процесів. Розроблену конструктивну схему самохідного вагона можна застосовувати під час розробки енергоефективних проектів пасажирських канатних доріг.

Ключові слова: канатна дорога; енергоефективність; самохідні вагони; альтернативний транспорт; питомі енерговитрати; коефіцієнт корисної дії

Вступ

У всьому світі канатний транспорт називають транспортом майбутнього. Сучасні транспортні комплекси повинні в повному обсязі забезпечувати міських мешканців потреби у пасажирському та вантажному русі. Підвісний канатний шлях за будь-якого рельєфу має низькі витрати на будівництво і експлуатацію. Екологічна чистота, безпека, швидкість руху, значна пропускна здатність – ці фактори стали визначальними для використання канатного транспорту не тільки для туристичних розваг, а й для пасажирських перевезень нарівні з традиційними видами транспорту – автомобілями, залізницею, трамваями тощо. Використання підвісних канатних доріг (далі – ПКД) дозволяє зменшити транспортне навантаження на автомобільні шляхи. ПКД можуть мати велику відстань між опорами, проходити над будинками, селищами, лісонасадженнями, а також долати водні перешкоди великої протяжності.

Підвісні канатні дороги є універсальним транспортним засобом, який має суттєві переваги над наявними машинами, що забезпечують перевезення вантажів і людей. Обсяги витрат на спорудження й утримання ПКД є значно меншими, ніж відповідні величини, що характеризують інші види транспорту [6].

Використання сучасних технологій дозволило створити надійні системи транспорту, інтегровані в міське середовище. Економічна ефективність є одним із головних показників канатного транспорту [15]. Застосування канатної тяги пояснюється меншими енерговитратами за рахунок поєднання кінцевих (та проміжних) точок призначення за найкоротшою відстанню. Також існує можливість регулювання кількості вагонів на трасі залежно від навантаженості лінії та можливість автоматизації роботи на ділянках між районами міста.

Під час проектування підвісних канатних доріг здійснюють пошук оптимально-компромісного рішення, яке відповідає умовам економічної ефективності, технологічності й безпеки.

Порівняльну оцінку ефективного впровадження в експлуатацію вагонів і енергоощадних технологій, продуктивності й економічності машин та агрегатів проводять по експлуатаційними й приведеними витратами [12].

Правила будови й безпечної експлуатації підвісних канатних доріг НПАОП 60.2-1.02-14 встановлюють вимоги безпеки щодо обладнання підвісних канатних доріг для перевезення пасажирів і поширюються на суб'єктів господарювання незалежно від форм власності й організаційно-правових форм, що займаються його виготовленням, монтажем, демонтажем, налагодженням, експлуатацією, ремонтом, технічним обслуговуванням і модернізацією [9].

Порівнюємо типи пасажирських підвісних канатних доріг за кількістю канатів.

У підвісних дорогах одноканатного типу канат одночасно виконує тягову й несучу функції. Під час проходження зон для посадки та висадки пасажирів можливою є зупинка вагонів; водночас система має високу пропускну здатність. Одноканатні підвісні дороги стають більш поширеними в умовах сучасної міської мобільності. Основні характеристики цього типу канатної дороги [1]:

- пропускна здатність – до 4 500 чол./год;
- швидкість руху вагонів – до 6 м/с;
- місткість вагонів – до 10 чол.

Дво- та багатоканатні підвісні дороги мають один тяговий канат і пересуваються по одному або двох несучих канатах. Дороги таких типів дозволяють змінювати кількість вагонів на трасі, а також мають високу пропускну здатність, гарантують надзвичайну стабільність руху в разі значного підвищення швидкості вітру [7]. Основні характеристики цього типу канатної дороги:

- пропускна здатність – до 6 000 чол./год;
- швидкість руху вагонів – до 8,5 м/с;
- місткість вагонів – до 35 чол.

Класифікацію ПКД за типами вагонів представлено на рис. 1 [8].

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

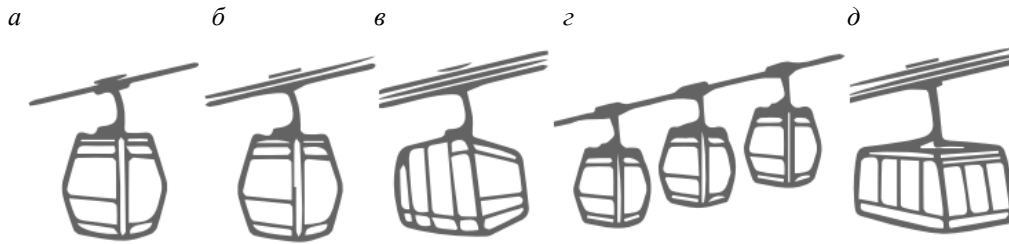


Рис. 1. Пасажирські підвісні канатні дороги за типами вагонів:
а) одноканатний знімний; б) двоканатний знімний, в) багатоканатний знімний; г) групові оборотні вагони; д) повітряний трамвай

Перевагами підвісних канатних доріг перед іншими видами транспорту є:

1. Невеликі капітальні вкладення та експлуатаційні витрати. Витрати на впровадження системи канатної дороги становлять приблизно половину витрат на трамвай та приблизно 1/10 витрат на метро [16].

2. Постійні перевезення – канатні дороги гарантують безперервний час подорожі, не перешкоджають дорожньому руху інших видів транспорту.

3. Швидке створення – відразу після замовлення канатні дороги можуть бути побудовані за короткий проміжок часу. В основному це можливо завдяки використанню модульних конструкцій.

4. Низька потреба в просторі – під час проектування канатних доріг враховують розташування всіх можливих перешкод, що є особливо актуальним у густо забудованих міських районах. Опори й станції займають відносно невелику частину простору, а канатні лінії зручно інтегруються в міський пейзаж.

5. Екологічність – канатні дороги не мають шкідливих викидів, оскільки тип приводу системи – електричний.

6. Окрема траса, яка не перетинає наявні транспортні шляхи.

7. Незначна залежність від рельєфу та перепаду висот – канатні дороги можуть пролягати по більш крутих схилах, ніж будь-які наземні шляхи, і вони придатні для використання в будь-якій місцевості [1].

8. Архітектура – архітектори й конструктори мають багато творчих можливостей для проектування станцій, опор та інтер'єру й екстер'єру вагонів канатної дороги.

Враховуючи переваги ПЖД, очевидною є можливість їх широкого використання для вирішення транспортної проблеми мегаполісів.

Мета

За основну мету статті ми ставимо формування та обґрунтування показників енергоефективності канатних доріг традиційної конструкції та доріг із самохідними вагонами на основі порівняння їх величин.

Обґрунтування показників енергоефективності канатних доріг дозволяє в повному обсязі визначитися з напрямом подальших досліджень у сфері розвитку альтернативного виду міського транспорту.

Методика

Поняття енергоефективності введено в проєкті Закону України «Про енергетичну ефективність» та сформульовано так: енергетична ефективність – співвідношення між обсягом вироблених благ (результатів діяльності (функціонування), виробленої продукції (товарів, робіт, послуг) та енергії) і обсягом енергії, використаної для виробництва таких благ [11]. Аналогічне поняття представлено у чинному Законі України «Про енергетичну ефективність будівель», в якому зазначено, що енергетична ефективність будівлі – це властивість будівлі, яка характеризується кількістю енергії, необхідної для створення належних умов проживання та/або життєдіяльності людей у такій будівлі [4]. Також відмітимо, що порівняння конструкцій різного типорозміру доцільно виконувати за питомими показниками – відношенням абсолютних величин до основного показника конструкції (наприклад, продуктивності). Зва-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

жаючи на це, будемо вважати, що енергоефективність канатної дороги – це властивість дороги, яка характеризується кількістю енергії, необхідної для здійснення транспортного процесу.

Для порівняння канатних доріг необхідно визначити параметри енергоефективності для кожного їх типу.

Для отримання вихідних даних проведено огляд світових напрямів розвитку канатних доріг. Запропоновано аналітичні формули для визначення показників енергоефективності, за якими виконано порівняння канатних доріг традиційної конструкції та доріг із самохідними вагонами. При цьому враховано вплив ступеня завантаженості й номінальної потужності на коефіцієнт корисної дії електродвигуна. З метою врахування розсіювання енергії в тяговому канаті через його пружні властивості було введено поняття коефіцієнта корисної дії тягового канату.

Результати

Замість ПКД традиційної конструкції пропонуємо використання канатних доріг із самохідними вагонами як одне з можливих рішень транспортної проблеми великих міст. Від використання такої транспортної системи очікуємо наступні переваги: високу мобільність, зменшені енерговитрати за рахунок використання електроприводів меншої потужності, ніж у традиційних ПКД, та проектування принципово нової конструкції приводу вагона із сучасними електродвигунами.

Застосування сучасних програмних комплексів для інженерних розрахунків і створення моделей із високою достовірністю отриманих результатів дозволяють підтвердити доцільність використання інноваційних ідей, а також наглядно представити результати конструкторського й дизайнерського рішень. Під час моделювання конструкції самохідної системи використано принцип – чим простіша система, тим вища надійність, а також принципи часткової та повної взаємозаміни.

Задача дослідження – порівняти дві канатні дороги: традиційної конструкції (із тяговим канатом) та із самохідними вагонами, виходячи з необхідності мінімізації приведених енерговитрат.

На відміну від канатних доріг традиційної конструкції (з тяговим або несуче-тяговим канатом), підвісні канатні дороги з децентралізованою тягою мають самохідні вагони або групу вагонеток, що переміщують за допомогою локомотива. Відмінною властивістю таких доріг є також горизонтальний або з невеликим нахилом підвісний шлях, в основному рейковий, а також можливість обладнати самохідні вагони підйомними механізмами. Ці дороги мають електричну тягу [1].

Самохідний транспортний засіб – це транспортний засіб, обладнаний рушієм, завдяки якому він може сам пересуватися без залучення зовнішніх сил, за наявності акумуляторів – приладів для накопичення енергії з метою подальшого її використання.

Підставою для створення нової системи альтернативного транспорту (ПКД із самохідними вагонами) є такі її переваги:

1. компактність транспортних засобів;
2. інтервал руху від 50 метрів;
3. автоматизована система керування;
4. самохідний принцип руху;
5. окремий шлях, інтегрований у складну міську забудову.

Метою застосування підвісної самохідної транспортної системи замість канатних доріг традиційної конструкції є підвищення енергоефективності й ступеня автоматизації транспортного процесу.

Низьких витрат енергії можна досягти за рахунок використання в самохідній транспортній системі:

- інноваційних технічних рішень;
- індивідуального приводу на кожному вагоні;
- рекуперації енергії під час гальмування;
- можливості використання відновлювальної енергії.

Конструкція підвісної канатної дороги із самохідними вагонами передбачає використання привідних електродвигунів на кожній одиниці рухомого складу замість єдиного централізованого приводу, розташованого на одній із станцій.

Для підвищення безпеки перевезень, комфорту пасажирів та енергоефективності в принципово новій конструкції пасажирського

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

вагона підвісної канатної дороги передбачено системи кондиціонування повітря, рекуперативного гальмування, накопичення енергії, автоматизованого управління рухом вагонів, контролю температури в середині та за межами кабіни, швидкості повітря, а також інтегральну систему безпеки (повернення кабін на станцію в разі будь-якої аварійної ситуації).

Передбачені такі основні параметри самохідної системи: максимальна швидкість руху вагонів, діаметр і тип канату, граничні температури роботи канатної системи, гранична швидкість вітру, максимальна пропускна здатність (кількість перевезених пасажирів за годину), питомі енерговитрати, ємність акумуляторної секції, споживана потужність, коефіцієнт завантаженості вагона, довжина траси в плані, приведений коефіцієнт опору руху вагонів.

Нова схема самохідного вагона (рис. 2) містить акумуляторні батареї для накопичення енергії з подальшим її використанням протягом руху від початкової станції до кінцевої.

Під час руху вагона вниз (спуску) є можливим накопичення енергії – підзарядка акумулятора, яка реалізується за рахунок використання рекуперативного гальмування. Повна зарядка повинна відбуватися на станції.

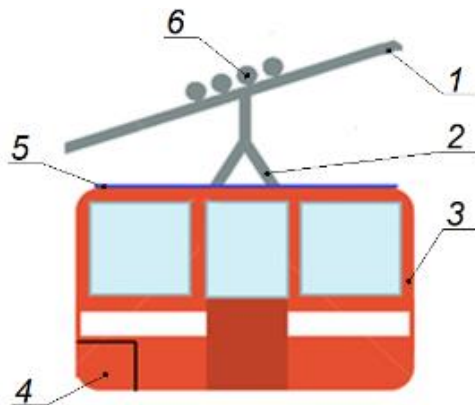


Рис. 2. Конструктивна схема самохідного вагона:

1 – несучий канат; 2 – кріплення кабіни до ходового обладнання; 3 – кабіна; 4 – акумуляторні батареї; 5 – сонячні панелі; 6 – привідні колеса

Канатна дорога з самохідними вагонами передбачена одноканатного типу, при цьому канат буде не тяговим, а лише несучим. Індивідуальний привід самохідного вагона надає руху кабіні відносно опорного канату, і кабіни переміщуються в потрібному напрямку.

Передбачено заряджання акумуляторів від сонячної енергії, а також її накопичення з метою подальшого використання.

Значною перевагою цієї схеми є можливість зупинки одного вагона на станції для посадки/висадки пасажирів.

За прототип підвісної самохідної транспортної системи взято корисну модель «підвісна надземна транспортна система» Кубланова Є. М. (рис. 3) [10].

Показниками ефективності канатної дороги є питомі енерговитрати й приріст коефіцієнта корисної дії (ККД).

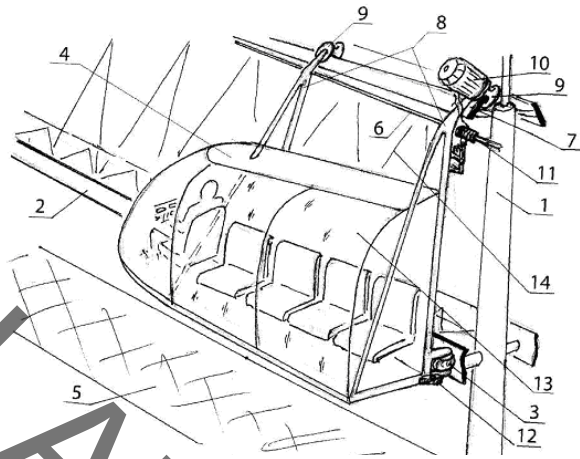


Рис. 3. Підвісна надземна транспортна система:

1 – опора; 2 – нижня рейка; 3 – рухомий елемент поперечного обмеження руху; 4 – вагон; 5 – платформа; 6 – трос під напругою; 7 – верхня рейка; 8 – силовий елемент; 9 – ролики; 10 – електричний двигун; 11 – струмознімач; 12 – елементи зчеплення; 13 – розсувні двері; 14 – силові розпірки

Питомі енерговитрати – кількість енергії, яка споживається канатною дорогою для перевезення одиниці транспортованого вантажу (або однієї людини – для пасажирських канатних доріг) [2].

Питомі енерговитрати канатної дороги можна визначити як відношення вихідної потужності її приводу до продуктивності канатної дороги (пропускної здатності):

$$e = \frac{P}{\Pi},$$

де e – енерговитрати; P – вихідна потужність приводу; Π – продуктивність дороги (пропускна здатність).

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Такий критерій дозволяє оцінити витрати енергії на транспортування пасажирів і вантажу (за масою, об'ємом, кількістю тощо) [6].

Вихідна потужність приводу:

$$P = 2 \cdot (m_0 + m_1) \cdot g \cdot L \cdot v \cdot w' \cdot \lambda,$$

де m_0 – маса вагона (порожнього); m_1 – сумарна маса пасажирів із багажем; g – прискорення вільного падіння; L – довжина траси в плані; v – швидкість руху вагонів; w' – приведений коефіцієнт опору руху вагонів; λ – крок навішування вагонів.

Пропускна здатність пасажирської ПКД:

$$P = \lambda \cdot m_1 \cdot v,$$

Тоді енерговитрати приводу:

$$e = 2 \cdot (1 + k_m) \cdot g \cdot L \cdot w'.$$

Аналіз отриманої залежності свідчить, що факторами, які впливають на питомі енерговитрати, є:

- довжина траси в плані L ;
- коефіцієнт завантаженості вагона

$$k_m = \frac{m_0}{m_1};$$

- приведений коефіцієнт опору руху вагонів w' .

Питомі енерговитрати для дороги традиційної конструкції (із тяговим канатом):

$$e_{\text{ТК}} = 2 \cdot \left(1 + k_m + \frac{q_T \lambda}{m_1} \right) \cdot (f \cdot L + H) \cdot g,$$

де f – коефіцієнт опору руху вагонів і тягового канату; q_T – розподілене навантаження, що враховує масу канату й вагонів.

Питомі енерговитрати для дороги із самохідними вагонами (без тягового канату):

$$e_{\%/\text{ТК}} = 2 \cdot (1 + k_m) \cdot g \cdot L \cdot w'.$$

Оскільки коефіцієнт f враховує опір руху вагонів і тягового канату, а коефіцієнт w' – тільки опір руху вагонів, можна стверджувати, що:

$$e_{\%/\text{ТК}} = 2 \cdot (1 + k_m) \cdot g \cdot L \cdot w' < 2 \cdot (1 + k_m) \cdot g \cdot L \cdot f$$

Перетворимо вирази для визначення $e_{\text{ТК}}$ з метою приведення його у відповідність з формулою для $e_{\%/\text{ТК}}$:

$$e_{\text{ТК}} = 2g \cdot [(1 + k_m) \cdot f \cdot L + H(1 + k_m) + \frac{q_T \cdot \lambda}{m_1} \times (fL + H)];$$

$$e_{\text{ТК}} = 2(1 + k_m) \cdot g \cdot f \cdot L + 2g \cdot [(1 + k_m)H + \frac{q_T \cdot \lambda}{m_1} (f \cdot L + H)].$$

Нехай $w' \approx f$, тоді:

$$e_{\text{ТК}} = e_{\%/\text{ТК}} + \Delta e,$$

де Δe – надлишкові питомі енерговитрати, обумовлені витратами енергії на підйом вагонів і переміщення тягового канату для дороги традиційної конструкції;

$$\Delta e = 2 \cdot g \cdot \left[(1 + k_m) \cdot H + \frac{q_T \lambda}{m_1} \cdot (f \cdot L + H) \right].$$

З останніх виразів видно, що питомі енерговитрати для доріг традиційної конструкції (з тяговим канатом) перевищують такі для доріг із самохідними вагонами.

Відсутність тягового канату дозволить знизити питомі енерговитрати. Однак використання індивідуального приводу призводить до збільшення маси вагона (m_0), що може бути причиною збільшення приведених енерговитрат.

Як відомо, ККД механічної системи – добуток усіх ККД складових, що входять до цієї системи [3]. Розглянемо принципові схеми приводів самохідного вагона (рис. 4) та підвісних канатних доріг традиційного типу (рис. 5).

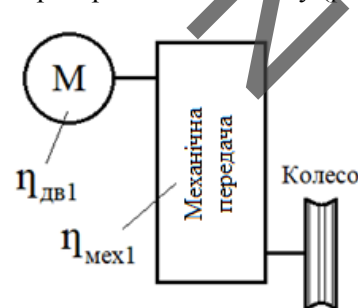


Рис. 4. Схема приводу самохідного вагона

Загальний ККД приводу самохідного вагона:

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

$$\eta_{\text{заг1}} = \eta_{\text{дв1}} \cdot \eta_{\text{мех1}},$$

де $\eta_{\text{дв1}}$ – ККД електродвигуна самохідного вагона; $\eta_{\text{мех1}}$ – ККД механічної передачі.

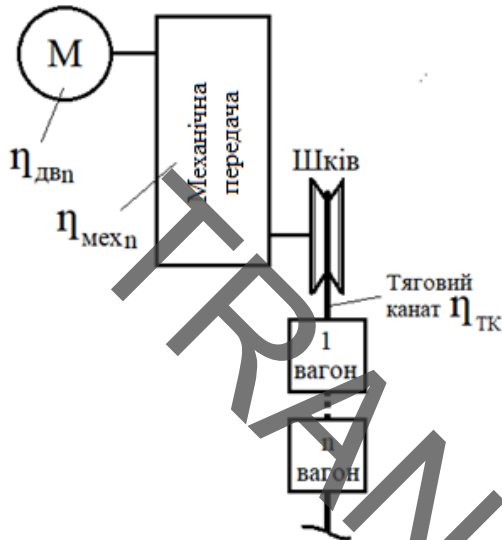


Рис. 5. Схема приводу ПКД традиційного типу

Загальний ККД приводу підвісних канатних доріг традиційного типу:

$$\eta_{\text{загп}} = \eta_{\text{двп}} \cdot \eta_{\text{мехп}} \cdot \eta_{\text{тк}},$$

де $\eta_{\text{дв.п}}$ – ККД електродвигуна канатної дороги традиційного типу; $\eta_{\text{мех.п}}$ – ККД механічної передачі; $\eta_{\text{тк}}$ – ККД тягового канату – величина, що характеризує розсіювання енергії за рахунок демпфуючих властивостей канату.

Поняття коефіцієнта корисної дії тягового канату введено умовно для врахування його властивостей щодо розсіювання енергії під час транспортування.

Знайдемо приріст ККД:

$$\Delta\eta = \eta_{\text{заг1}} - \eta_{\text{загп}}.$$

Якщо $\Delta\eta > 0$, то канатна дорога із самохідними вагонами є більш енергоефективною, ніж дорога традиційної конструкції.

Коефіцієнт корисної дії двигуна може варіюватися залежно від таких параметрів:

- 1) номінальна потужність;
- 2) ступінь завантаженості;
- 3) номінальна частота обертання вала.

Залежність ККД електродвигуна від номінальної потужності можна зобразити у формі

графіка (рис. 6), що базується на аналізі коефіцієнтів корисної дії двигунів різної номінальної потужності за каталогами їх виробників [5].

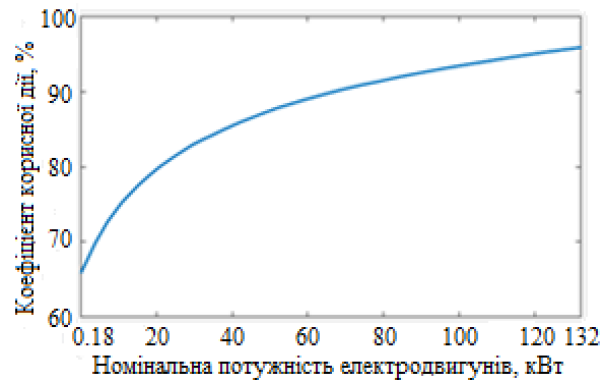


Рис. 6. Залежність ККД від номінальної потужності електродвигуна

Залежність коефіцієнта корисної дії від завантаження електродвигуна представлено на рис. 7. У разі перевантаження електродвигунів коефіцієнт корисної дії є нижчим за проектне значення [13].

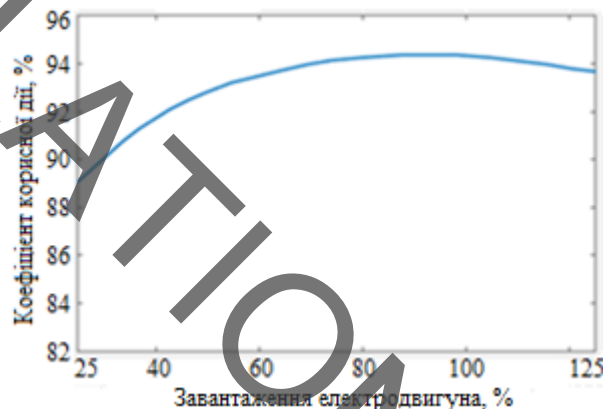


Рис. 7. Залежність ККД від завантаження електродвигуна

Проведений аналіз показав, що вплив номінальної частоти обертання вала на ККД електродвигуна є незначним (у межах 0,5 %).

Інтервал потужності електродвигунів для ПКД традиційного типу – 20...250 кВт. ККД двигунів відповідної потужності – 0,91...0,93. Для самохідних вагонів потужність двигунів становить 3...10 кВт. ККД таких двигунів суттєво змінюється: 0,81...0,87.

Оскільки конструктивно механізми передачі в обох випадках (самохідний вагон, ПКД тра-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

диційного типу) складаються з однакових компонентів, прийmemo їх ККД однаковими.

Розглянемо випадок, коли електродвигун ПКД традиційного типу завантажений на 25 % потужності. Такий випадок є можливим у разі виведення з траси 75 % вагонів через їх недовантаженість. При цьому для самохідних вагонів електродвигун завантажений на 100 %. Вважаємо, що в обох випадках вагони, які залишилися на трасі, завантажено повністю.

Приріст коефіцієнта корисної дії визначимо так:

$$\Delta\eta = \eta'_{дв1} \cdot \eta''_{дв2} \cdot \eta_{мех} - \eta'_{дв1} \cdot \eta''_{двп} \cdot \eta_{мехп} \cdot \eta_{ТК}$$

де $\eta'_{дв1}$, $\eta''_{двп}$ – величини, які враховують вплив потужності електродвигуна на його ККД для самохідного вагону та канатної дороги традиційного типу; $\eta''_{дв1}$, $\eta''_{двп}$ – величини, які враховують вплив завантаженості електродвигуна на його ККД для самохідного вагону та канатної дороги традиційного типу відповідно.

Тоді ККД тягового канату можна визначити як:

$$\eta_{ТК25\%} = \frac{\eta'_{дв1} \cdot \eta''_{дв1} \cdot \eta_{мех1}}{\eta'_{дв25} \cdot \eta''_{дв25} \cdot \eta_{мех25}} = \frac{\eta'_{дв1} \cdot \eta''_{дв1}}{\eta'_{дв25} \cdot \eta''_{дв25}} = \frac{0,94 \cdot 0,84}{0,83 \cdot 0,89} \approx 1,07 > 1.$$

ККД не може бути більшим за одиницю, а це означає, що в разі завантаженості обох доріг на 25 % перевагу за загальним ККД системи має дорога із самохідними вагонами.

Розглянемо випадок, коли електродвигун ПКД традиційного типу завантажений на 100 % потужності. При цьому для самохідних вагонів електродвигун залишається завантаженим на 100 %. За таких умов ККД тягового канату:

$$\eta_{ТК100\%} = \frac{\eta'_{дв1} \cdot \eta''_{дв1}}{\eta'_{дв100} \cdot \eta''_{дв100}} = \frac{0,94 \cdot 0,84}{0,94 \cdot 0,89} \approx 0,94.$$

ККД тягового канату менший за одиницю, а це означає, що існує граничне значення кількості вагонів $n_{гр}$, за якого підсумковий ККД канатної дороги традиційної конструкції та із самохідними вагонами є однаковим, незважаючи на відносно низький ККД електродвигунів останніх.

Для перевірки достовірності розрахунку складемо математичну блок-схему знаходження ККД тягового канату залежно від завантаженості електродвигунів (рис. 8).

За вихідні візьмемо дані, представлені вище, а також прийmemo ККД механізмів передачі 0,9 [14]. Для ККД канатних доріг традиційного типу залежно від навантаження (25–100 %) складемо матрицю вихідних даних. Матрицю ККД тягового канату отримаємо як результат математичних дій.

Із результату виконання математичних дій випливає, що в разі завантаження електродвигуна ПКД традиційного типу менше ніж на 50 % самохідні вагони гарантовано матимуть перевагу, незважаючи на низький ККД електродвигунів відносно малої потужності. Це вказує на наявність певних умов, за яких використання ПКД із самохідними вагонами замість доріг традиційного типу є доцільним і виправданим із точки зору енергетичної ефективності.

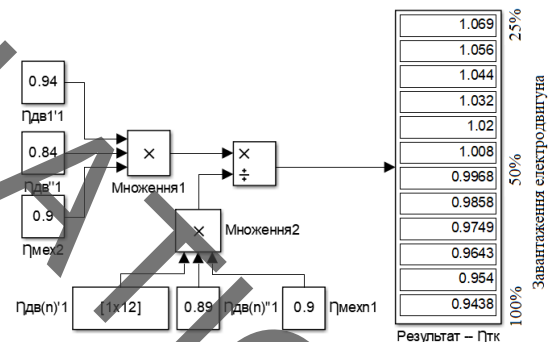


Рис. 8. Математична блок-схема визначення коефіцієнта корисної дії тягового канату в програмному додатку Simulink

Коефіцієнт корисної дії тягового канату в реальних умовах є завжди менший за одиницю.

Наукова новизна та практична значимість

Автори вперше запропонували й обґрунтували показники енергоефективності, які дозволяють здійснювати порівняльний аналіз канатних доріг традиційної конструкції та доріг із самохідними вагонами. Визначили залежність цих показників від параметрів канатної дороги.

Результати проведеного порівняльного аналізу канатної дороги традиційної конструкції

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

з дорогами, які містять самохідні вагони, за запропонованими показниками енергоефективності можуть бути використані для обґрунтування доцільності застосування певних видів канатних доріг з метою реалізації окремих транспортних процесів.

Розроблену конструктивну схему самохідного вагона можна застосовувати під час розробки енергоефективних проектів пасажирських канатних доріг.

Висновки

Питомі енерговитрати для доріг традиційної конструкції (з тяговим канатом) перевищують такі для доріг із самохідними вагонами. Відсутність тягового канату дозволить знизити питомі енерговитрати. Однак використання інди-

відуального приводу призводить до збільшення маси вагона, що може бути причиною збільшення приведених енерговитрат.

На конкретному прикладі порівняні канатні дороги із самохідними вагонами та дороги традиційного типу за критерієм приросту енергоефективності. Уведено поняття коефіцієнт корисної дії тягового канату ПКД, що враховує розсіювання енергії. Для розрахунку канатних доріг із самохідними вагонами відсутній ККД тягового канату, оскільки канат – опорний.

Встановлено, що підсумковий ККД канатної дороги традиційної конструкції може бути зіставним із ККД дороги з самохідними вагонами за рахунок доцільного завантаження електродвигунів останніх.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Банько, В. Г. Будівлі, споруди та обладнання туристських комплексів : навчальний посібник / В. Г. Банько. – 2-ге вид, перер. та доп. – Київ : Дакор, 2008. – 325 с.
2. ДСТУ 2420-94. Енергоощадність. Терміни та визначення. – Київ : Державний Стандарт України, 1994. – 13 с.
3. Жемеров, Г. Г. Энергоэффективность системы электроснабжения метрополитена с рекуперацией электроэнергии при торможении / Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, А. В. Машура // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2019. – № 5. – С. 25–31. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.04
4. Закон України № 2118-VIII від 22.06.2017 р. «Про енергетичну ефективність будівель» / *Відомості Верховної Ради (ВВР)*, 2017. – № 33, ст. 359.
5. Каталог електродвигателів АИР [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://systemax.ua/elektrodvigateli/trehfaznye-obshepromyshlennye-elektrodvigateli/air/> – Назва з екрана. – Перевірено : 27.11.2019
6. Куроп'ятник, О. С. Обґрунтування шляхів підвищення енергоефективності канатних доріг / О. С. Куроп'ятник // *Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences : Conference proceedings (Radom, Republic of Poland, December 27–28, 2017)*. – Radom, 2017. – P. 159–162.
7. Малыбаев, С. К. Специальные виды промышленного транспорта / С. К. Малыбаев, А. Н. Данияров. – Караганда, 2011. – 211 с.
8. Матеріали інтернет-сайтів виробників підвісних канатних доріг [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.doppelmayr.com; www.skado.ru; www.poma.net; www.leitner-goreways.com – Назва з екрана. – Перевірено : 27.11.2019
9. НПАОП 60.2-1.02-14: Правила будови і безпечної експлуатації підвісних канатних доріг [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://dnaop.com/html/32423/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_60.2-1.02-14 – Назва з екрана. – Перевірено : 27.11.2019
10. Пат. 54262 Україна, МПК51 В61В 3/00, В61В 13/00. Підвісна надземна транспортна система / Кубланов Є. М. ; заявник та власник патенту Кубланов Є. М. – №u200814870 ; заявл. 24.12.2008 ; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21. – 3 с.
11. Проект Закону України «Про енергетичну ефективність» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://sae.gov.ua/sites/default/files/Draft_EE_18_09_2017.docx – Назва з екрана. – Перевірено : 27.11.2019
12. Ракша, С. В. Обоснование способов снижения энергопотребления подвесных канатных дорог / С. В. Ракша, О. С. Куроп'ятник, А. О. Курка // *Наука та прогрес транспорту*. – 2014. – № 1 (49). – С. 125–131. doi: 10.15802/stp2014/22677

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

13. Формула КПД электродвигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://electric-220.ru/news/formula_kpd_ehlektrodvigatelja/2016-10-19-1090 – Назва з екрана. – Перевірено : 27.11.2019
14. Шейнблит, А. Е. Курсовое проектирование деталей машин : Учеб. Пособие / А. Е. Шейнблит. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Калининград, 2002. – 454 с.
15. Frequency analysis of vehicle drive with cable traction / S. Raksha, O. Kuropiatnyk, P. Anofriev, D. Onoprychuk, I. Kovalov // MATEC Web of Conferences. – Vol. 230, No. 01010. – P. 1–8. doi: 10.1051/mateconf/201823001010
16. The urban cable transport magazine international [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.siurban.com/media/files/urban2__englisch_web.pdf – Назва з екрана. – Перевірено : 27.11.2019

С. В. РАКША^{1*}, А. С. КУРОП'ЯТНИК^{2*}, А. Л. КРАСНОЦОК^{3*}

^{1*}Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, эл. почта raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

^{2*}Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 674 26 44, эл. почта kuropiatnyk@gmail.com, ORCID 0000-0001-5581-3883

^{3*}Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (098) 706 27 43, эл. почта sasha96.08.20@email.ua, ORCID 0000-0002-0140-5179

ОБОСНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КАНАТНЫХ ДОРОГ

Цель. Основной целью статьи мы ставим формирование и обоснование показателей энергоэффективности канатных дорог традиционной конструкции и дорог с самоходными вагонами основе сравнения их величин. Обоснование показателей энергоэффективности канатных дорог позволяет в полном объеме определиться с направлением дальнейших исследований в области развития альтернативного вида городского транспорта. **Методика.** Для получения исходных данных проведен обзор мировых направлений развития канатных дорог. Предложены аналитические формулы для определения показателей энергоэффективности, по которым выполнено сравнение канатных дорог традиционной конструкции и дорог с самоходными вагонами. При этом учтено влияние степени загруженности и номинальной мощности на коэффициент полезного действия электродвигателя. С целью учета рассеяния энергии в тяговом канате из-за его упругих свойств было введено понятие коэффициента полезного действия тягового канату. **Результаты.** Сформирована методика подсчета коэффициента полезного действия канатных дорог. Разработаны формулы для определения энергоэффективности и оценено влияние характеристик канатной дороги на их расчетные значения. Построены графики зависимости коэффициента полезного действия самоходной канатной дороги от номинальной мощности электродвигателя и коэффициента полезного действия от загруженности привода подвесной канатной дороги. Также сравнены общие коэффициенты полезного действия для канатных дорог с самоходными вагонами и для дорог традиционной конструкции. Приведенные результаты основываются на усредненных значениях параметров электродвигателей при их разной нагрузке. **Научная новизна.** Авторы впервые предложили и обосновали показатели энергоэффективности, которые позволяют осуществлять сравнительный анализ канатных дорог традиционной конструкции и дорог с самоходными вагонами. Определили зависимость этих показателей от параметров канатной дороги. **Практическая значимость.** Результаты проведенного сравнительного анализа канатной дороги традиционной конструкции с дорогами, которые используют самоходные вагоны, по предложенным показателям энергоэффективности могут быть использованы для обоснования целесообразности применения определенных видов канатных дорог с целью реализации отдельных транспортных процессов. Разработанную конструктивную схему самоходного вагона можно применять при разработке энергоэффективных проектов пассажирских канатных дорог.

Ключевые слова: канатная дорога; энергоэффективность; самоходные вагоны; альтернативный транспорт; удельные энергозатраты; коэффициент полезного действия

S. V. RAKSHA^{1*}, O. S. KUROIPIATNYK^{2*}, O. L. KRASNOSHCHOK^{3*}

^{1*}Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

^{2*}Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 674 26 44, e-mail kuropyatnick@gmail.com, ORCID 0000-0001-5581-3883

^{3*}Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (098) 706 27 43, e-mail sasha96.08.20@email.ua, ORCID 0000-0002-0140-5179

JUSTIFICATION OF CRITERIA FOR ROPEWAYS ENERGY EFFICIENCY

Purpose. The article is aimed to form and justify the energy efficiency indicators of ropeways of traditional design and ropeways with self-propelled wagons based on the determination and comparison of their values. The substantiation of the energy efficiency criteria of ropeway wagons allows us to determine fully the direction of further research in the field of development of alternative transport mode. **Methodology.** To obtain initial data, the authors reviewed the world trends in the development of ropeway wagons, proposed analytical formulas for determining criteria for ropeways` energy efficiency used to compare traditional ropeways and ropeways with self-propelled wagons. Herewith, we took into account the influence of the loading degree and rated power on the electric motor efficiency. In order to take into account the energy dissipation in the haul rope through its elastic properties, the concept of the efficiency coefficient of the haul rope was introduced. **Findings.** The authors formed a methodology for calculating the efficiency of ropeways, developed formulas for determining energy efficiency. We assessed the influence of the ropeway characteristics on their calculated values; constructed dependence graphs of the self-propelled ropeway efficiency coefficient on the rated electric motor power and the efficiency coefficient on the ropeway drive loading, as well as compared general efficiency coefficients for ropeways with self-propelled wagons and for ropeways of traditional design. The results are based on the averaged values of the electric motors parameters at their different loads. **Originality.** The authors first proposed and justified the energy-efficiency criteria for ropeways that make it possible a comparative analysis of traditional ropeways and those with self-propelled wagons. We determined the dependence of these indicators on the ropeway parameters. **Practical value.** The results of the comparative analysis of traditional construction of ropeways and the ropeways with self-propelled wagons, based on the proposed energy efficiency indicators, can be used to substantiate the feasibility of using certain type of ropeways for the implementation of individual transport processes. The construction diagram of a self-propelled wagon can be used in the development of energy efficient passenger ropeway projects.

Keywords: ropeway; energy efficiency; self-propelled wagons; alternative transport; specific energy consumption; efficiency coefficient

REFERENCES

1. Banko, V. G. (2008) *Budivli, sporudy ta obladnannia turystykykh kompleksiv: navchalnyi posibnyk (2nd ed.)*. Kiev: Dokor. (in Ukrainian)
2. *Enerhooshchadnist. Terminy ta vyznachennia.13 DSTU 2420-94 (1994)*. (in Ukrainian)
3. Zhemerov, G. G., Krylov, D. S., & Mashura, A. V. (2019). Energy efficiency of the subway electrical supply system with electrical energy recovery at braking. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 5, 25-31. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.04 (in Russian)
4. Zakon Ukrainy № 2218-VIII (2017). *Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny*. (in Ukrainian)
5. Katalog elektrodvigateley AIR. Retrieved from <https://systemax.ua/elektrodvigateli/trehfaznyebshpromyshlennye-elektrodvigateli/air/> (in Russian)
6. Kuropiatnyk, O. S. (2017). *Obgruntuvannia shliakhiv pidvyshchennia enerhoefektyvnosti kanatnykh dorih, Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences: Conference proceedings*. Radom. (in Ukrainian)
7. Malybaev, S. K., & Daniyarov, A. N. (2011). *Spetsialnye vidy promyshlennogo transporta*. Karaganda. (in Russian)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

8. Materialy internet-saitiv vyrobnykiv pidvisnykh kanatnykh dorih. Retrieved from www.doppelmayr.com; skado.ru; poma.net; leitner-ropeways.com (in English)
9. НРАОР 60.2-1.02-14: Pravyla budovy i bezpechnoi ekspluatatsii pidvisnykh kanatnykh dorih. Retrieved from https://dnaop.com/html/32423/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_60.2-1.02-14 (in Ukrainian)
10. Kublanov, Ye. M. (2010). UA Patent No. 54262. Kyiv: Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (in Ukrpatent). (in Ukrainian)
11. Proekt Zakonu Ukrainy «Pro enerhetychnu efektyvnist». Retrieved from https://sae.gov.ua/sites/default/files/Draft_EE_18_09_2017.docx (in Ukrainian)
12. Raksha, S. V., Kuropiatnyk, O. S., & Kurka, A. O. (2014). Substantiation of ways of decrease in power consumption of ropeways. . *Science and transport progress*, 1(49), 125-131. doi: 10.15802/stp2014/22677 (in Ukrainian)
13. Formula KPD elektrodvigatelya. Retrieved from https://electric-220.ru/news/formula_kpd_ehlektrodvigatelja/2016-10-19-1090 (in Ukrainian)
14. Scheinblit, A. E. (2002). *Kursovoe proektirovanie detaley mashin: Uchebnoe Posobie*. Kaliningrad. (in Russian)
15. Raksha, S., Kuropiatnyk, O., Anofriev, P., Onoprechuk, D., & Kovalov, I. (2018). Frequency analysis of vehicle drive with cable traction. *MATEC Web of Conferences* 230(01010). doi: 10.1051/mateconf/201823001010.
16. The urban cable transport magazine international. Retrieved from http://www.siurban.com/media/files/urban2__englisch_web.pdf

Надійшла до редколегії: 30.07.2019

Прийнята до друку: 01.11.2019