

М. Б. КУРГАН, Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА, С. Ю. БАЙДАК (ДНУЗТ)

Кафедра «Проектування і будівництво доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 373-15-48, ел. пошта: [kunibor@mail.ru](mailto:kunibor@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-8182-7709](http://orcid.org/0000-0002-8182-7709)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ОДНОКОЛІЙНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ

### Аналіз стану проблеми

В найближчій перспективі Укрзалізниця планує реалізовувати проекти з електрифікації ділянок залізниць, що ведуть до портів Одеси й Миколаєва, а також до кордонів із Польщею та Білоруссю.

В республіці Білорусь ведуться роботи з електрифікації залізниць з перспективним виходом на територію України за декількома напрямками: Гомель – Чернігів і Жлобин – Калинковичі – Коростень. В свою чергу в Україні зараз допрацьовується документація щодо електрифікації напрямків на Білорусь і Польщу: Бердичів – Коростень – Словечно – Держкордон, Чернігів – Горностаївка – Держкордон (рис. 1), Ковель – Ізов – Держкордон (рис. 2).



Рис. 1. Вихід з Білорусі в Україну (електрична тяга – Гомель–Жлобин–Бобруйск)

Таким чином, це буде перший пострадянський досвід електрифікації через нові кордони.

Згідно з проектом, планується перевести на електротягу магістральну ділянку Львівської залізниці Ковель – Володимир-Волинський – Ізов (див. рис. 2). Крім того, проект лежить в контексті розвитку маршруту «Вікінг» за рахунок створення додаткового напрямку Польща – Чорне море по електрифікованому коридору.



Рис. 2. Вихід в Польщу (Ковель – Ізов – Держкордон)

Для Укрзалізниці електрифікація ділянки Чернігів – Гомель дуже важлива, бо це дозволить завершити електрифікацію Чернігівського вузла й продовжити тягове плече для електровозів від Києва до Гомеля на напрямку Мінськ – Жлобин – Гомель – Чернігів – Ніжин (рис. 3).

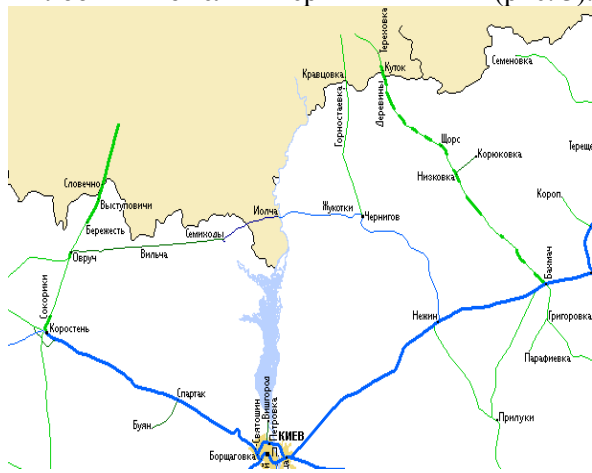


Рис. 3. Вихід з Білорусі на Бахмач і Коростень

На напрямку з Білорусі на південь і схід України (див. рис. 3) значний рух вантажних поїздів, але рішення щодо електрифікації ділянки Гомель – Бахмач поки що не прийнято.

Також є проект електрифікації ділянки Жлобин – Калинковичі – Коростень і домовленість з литовською залізницею про з'єднання електрифікованої мережі Білорусі з електрифікованою ділянкою Литви в районі Вільнюса (рис. 4)

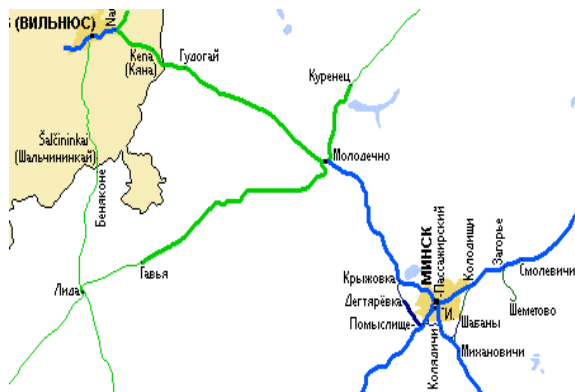


Рис. 4. Вихід з Білорусі до Литви

У 2015 році планується завершити електрифікацію трьох ділянок: Гомель – Жлобин, Жлобин – Калинковичі і Молодечно – Гудогай –Держкордон. Таким чином, буде створено єдиний міжнародний електрифікований коридор з України через Білорусь в країни Балтії.

На сьогодні пропускна спроможність одноколіїних ділянок залізниць з тепловозною тягою не задовольняє вимогам щодо обсягів перевезень, швидкості руху, екології та економії енергоресурсів.

У теперішній час від Києва до Гомеля (334 км) маршрутна швидкість складає 51,5 км/год. Середня швидкість руху поїздів Київ – Мінськ і Київ–Санкт-Петербург між станціями наведена на гістограмі (рис. 5).

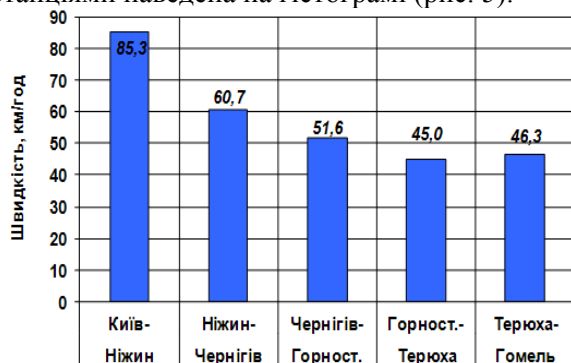


Рис. 5. Гістограма розподілу швидкості руху по ділянкам

Як видно з рис. 1, 3 і 5, технічне оснащення ділянок залізниць суттєво впливає на експлуатаційні показники. Так, ділянка Київ-Ніжин двоколіїна, електрифікована, Ніжин-Чернігів – одноколіїна, електрифікована, інші три ділянки – одноколіїні, на тепловозній тязі. На напрямку Чернігів – Горностаївка – Терюха – Гомель, середня швидкість руху в 1,2-1,3 рази нижче, ніж на одноколіїній електрифікованій ділянці і в 1,6-1,9 рази нижче, ніж на двоколіїній.

### Мета роботи

Представляється доцільним дослідити, наскільки покращуються тягово-енергетичні по-

казники при заміні тепловозної тяги на електричну на ділянках, що характеризуються різними умовами експлуатації, різною крутизною ухилів і обрисом поздовжнього профілю.

### Методика дослідження

Методика базується на аналізі потужностей локомотивів і сталої швидкості, що реалізується поїздом на різних ділянках поздовжнього профілю. Проведемо співставлення тягових характеристик тепловоза, наприклад, 2ТЕ116 і електровоза змінного струму 2ЕЛ5 як це рекомендовано в роботі [1], (рис. 6).

Швидкість руху поїзда на достатньої довжини елементі поздовжнього профілю залежить від типу локомотива, маси поїзда і загального опору руху. Так як тягові характеристики тепловоза і електровоза (див. рис. 6) суттєво відрізняються в діапазоні 30...70 км/год, то й швидкості руху на однакових елементах поздовжнього профілю будуть різні. Для виявлення сталої швидкості на різних за крутизною елементах профілю скористаємося сполученими графіками  $F_k(V)$  – тягова характеристика локомотива і  $W(V)$  – крива загального опору руху.

Загальний опір руху складається з основного опору руху  $W_o$ , опору від ухилу  $W_i$  і опору від кривизни колії  $W_r$  [2, 3]:  $W = W_o + W_i + W_r$ .

Абсциса точки перетину графіків  $F_k(V)$  і  $W(V)$  відповідає сталій швидкості руху поїзда на ухилі  $i$ .

Відомо, що переваги електричної тяги найбільше проявляються на крутих затяжних підйомах. Значення сталої швидкості для різних ухилів наведені в табл. 1

З аналізу рис. 6 і табл. 1 випливає, що вантажний поїзд однакової маси (для прикладу взято 4000 т) з локомотивом 2ЕЛ5 рухається із швидкістю в 1,9 і 2 рази швидше на ухилах відповідно 8 і 10‰ у порівнянні з тепловозною тягою.

Для визначення факторів, які впливають на енергетичні витрати, при тепловозній і електричній тязі, розглянемо рівняння руху поїзда

$$F_k = m a + W_o + W_i + W_r. \quad (1)$$

При відомій силі тязі, що витрачається на тягу поїздів, можна визначити механічну роботу локомотива на ділянці довжиною  $L$ :

$$R_m = \int F_k dS = \sum F_k \cdot \Delta S, \quad (2)$$

де  $l$  – частина ділянки  $L$ , на якій сила тяги локомотива  $F_k > 0$ .

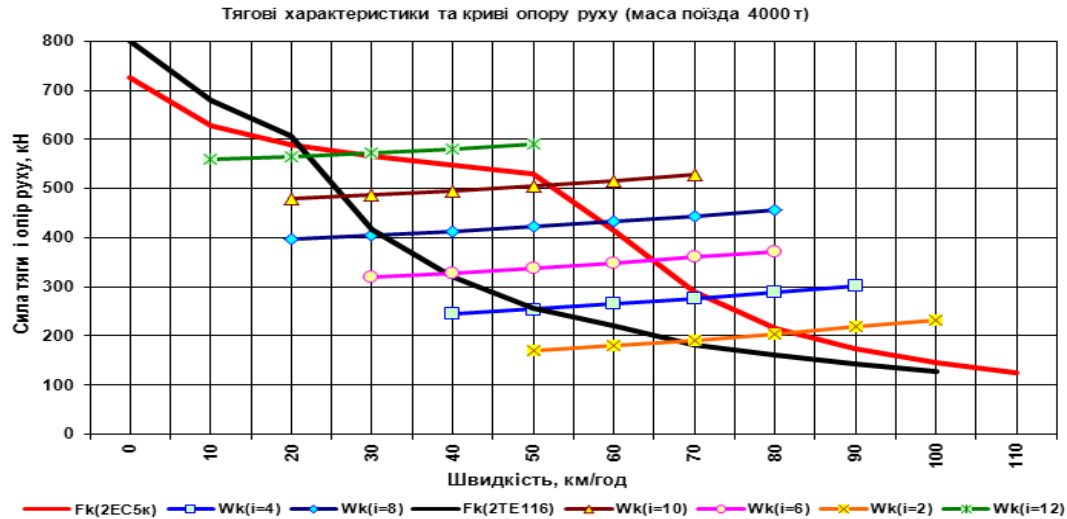


Рис. 6. Тягові характеристики і криві повного опору руху

Таблиця 1

Стала швидкість вантажних поїздів на крутих підйомах

Ухил, ‰	Стала швидкість, км/год		Зростання швидкості, разів 2ТЕ116 - 2ЕЛ5
	2ТЕ116	2ЕЛ5	
2	69	82	1,2
4	51	72	1,4
6	40	65	1,6
8	31	59	1,9
10	26	53	2,0
12	22	30	1,4

До ділянок  $l$  відносяться ділянки розгону, а також ділянки, на яких поїзд рухається з постійною швидкістю на підйомах, площадках і спусках, якщо сила додаткового опору руху від ухилу  $W_i$  і кривизни колії  $W_r$  не перевищує величини основного опору руху, тобто  $(W_i + W_r) < W_o$ . Основний опір руху має місце при русі поїзда по прямій і горизонтальній колії, і, в свою чергу, залежить від тертя кочення і ковзання коліс по рейкам, втрат живої сили від ударів і коливань, тобто в кінцевому підсумку – від стану рухомого складу і колії.

Для економічної оцінки витрат енергоресурсів при тепловозній і електричній тязі можна визначити витрати дизельного палива  $G$  (кг) і електроенергії  $A$  (кВт-год) через механічну роботу локомотива  $R_m$  (ткм) як  $G = k_g \cdot R_m$  – тепловозна тяга;  $A = k_a \cdot R_m$  – електрична тяга.

Такі залежності впливають з наступного. Відомо, що механічна робота визначається через дотичну силу тяги і пройдений шлях (2). Записавши пройдений шлях через швидкість  $V$  і час  $\Delta t$ , отримаємо  $R_m = \sum F_k \cdot V \cdot \Delta t$ . Витрати палива визначаються через одиничні витрати  $g$  і час  $\Delta t$ :

$$G = \int g dt = \sum g \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Аналогічно, витрати електроенергії можна визначити через напругу  $U$ , струм  $I$  і час  $\Delta t$ :

$$A = \int U \cdot I \cdot dt = \sum U \cdot I \cdot \Delta t. \quad (4)$$

Для визначення коефіцієнтів  $k_g$  і  $k_a$  необхідно знайти співвідношення між  $g$ ,  $U \cdot I$  і  $F_k \cdot V$ . В роботі [4], запропоновані апроксимуючі залежності:

а) для тепловозів:

$$k_g = 0,00002V^2 - 0,003V + 0,92; \quad (5)$$

б) для електровозів змінного струму:

$$k_a = 0,0002V^2 - 0,033V + 4,97. \quad (6)$$

При виконанні тягових розрахунків на кожному кроці визначається середня швидкість руху. По середній швидкості розраховуються значення коефіцієнтів  $k_g$  або  $k_a$ , а по зміні механічної роботи визначається приріст витрат палива або електроенергії.

В роботі досліджено питання зміни енергоємності вантажного поїзда, що рухається на різних за крутизною підйомів ділянках залізниці. Для порівнянності результатів були прийняті маси вантажного поїзда від 3000 т до 4500 т, керівний ухил змінювався від 8 до 12‰.

Розрахунки виконувались для різних за обрисом еталонних ділянок (профіль у вигляді «горба», «ями» і «підйом-спуск»). Найбільший ефект від впровадження електричної тяги досягається в третьому випадку. Так як найбільша різниця сталої швидкості має місце при ухилі 10‰ (див. табл. 1), то результати тягово-енергетичних розрахунків наведено для профілю у вигляді зтяжного підйому з таким ухилом (табл. 2).

Різниця у вартості витрат енергоресурсів на тягу поїздів складає 28-31% на користь електричної тяги (в залежності від співвідношення вартості 1 тонни палива і 1000 кВт-год електроенергії) (рис. 7, 8).

Так як середня швидкість руху поїздів на зтяжному підйомі при електричній тязі в 1,7-2,0 рази вища ніж при тепловозній, то час руху скорочується (рис. 9), а пропускна спроможність одноколіїної ділянки зростає.

Сказане можна проілюструвати таким прикладом. Пропускна спроможність одноколіїних перегонів у разі парного непакетного графіка визначається за формулою

$$n_n = \frac{(1440 - t_{mex}) \alpha_n}{t' + t'' + \tau_1 + \tau_2} = \frac{(1440 - t_{mex}) \alpha_n}{T_n}, \quad (7)$$

де  $t', t''$  - час руху по обмежуючому перегону відповідно в непарному і парному напрямках з урахуванням розгонів і сповільнень, хв;

$\tau_1, \tau_2$  - відповідно станційні інтервали на станціях, що обмежують перегін [5].

При довжині перегону  $l_n$  період графіка руху поїзда буде  $T_n = (t_o' + t_o'') \cdot l_n + \tau_1 + \tau_2$ . При

$l_n = 15$  км, масі поїзда  $Q = 4000$  т і  $t_o', t_o''$  (за даними табл. 2) отримуємо  $T_n = 58$  хв. при тепловозній тязі і  $T_n = 39$  хв. – при електричній. За формулою (7) пропускна спроможність складає відповідно 21 і 31 пар поїздів на добу. Отже, в розглянутому прикладі впровадження електричної тяги підвищує пропускну спроможність на 10 пар поїздів на добу.

Таблиця 2

Тягово-енергетичні розрахунки на 1 поїздо-км для профілю «підйом-спуск»

Напрямок руху	$V_{max}$ , км/год	$V_{сер}$ , км/год	Витрати енергоносіїв, кг (кВт·год)	Мех. робота, ткм	Робота гальмівних сил, ткм	Час руху, хв
<b>2ТЕ116, Q=3000 т</b>						
непарн.	51	34	28,0	36,4	1,0	1,76
парний	80	73	1,2	1,5	21,9	0,82
<b>2ЕЛ15, Q=3000 т</b>						
непарн.	73	61	141,5	38,2	1,6	0,98
парний	80	74	6,8	1,7	21,6	0,81
<b>2ТЕ116, Q=3500 т</b>						
непарн.	47	30	32,1	41,5	1,1	2,00
парний	80	73	1,2	1,6	25,2	0,82
<b>2ЕЛ15, Q=3500 т</b>						
непарн.	70	58	163,1	43,7	1,9	1,04
парний	80	73	7,5	1,9	24,9	0,82
<b>2ТЕ116, Q=4000 т</b>						
непарн.	45	27	36,2	46,6	1,2	2,26
парний	80	73	1,4	1,8	28,4	0,83
<b>2ЕЛ15, Q=4000 т</b>						
непарн.	67	55	185,0	49,3	1,6	1,09
парний	80	73	8,2	2,1	28,2	0,82
<b>2ТЕ116, Q=4500 т</b>						
непарн.	40	23	40,4	51,7	0,8	2,62
парний	80	72	1,4	1,9	31,7	0,83
<b>2ЕЛ15, Q=4500 т</b>						
непарн.	61	44	208,5	53,4	1,8	1,36
парний	80	73	8,8	2,3	31,4	0,82

© Курган М. Б. та ін., 2015

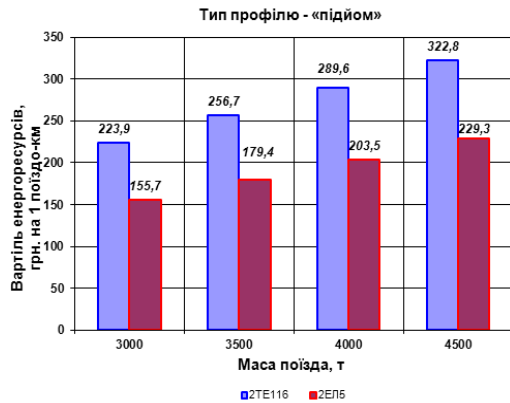


Рис. 7. Вартість енергоресурсів (підйом)

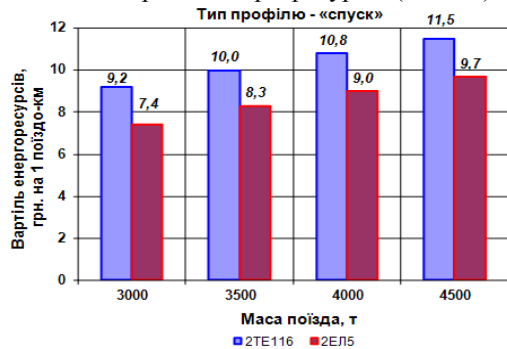


Рис. 8. Вартість енергоресурсів (спуск)

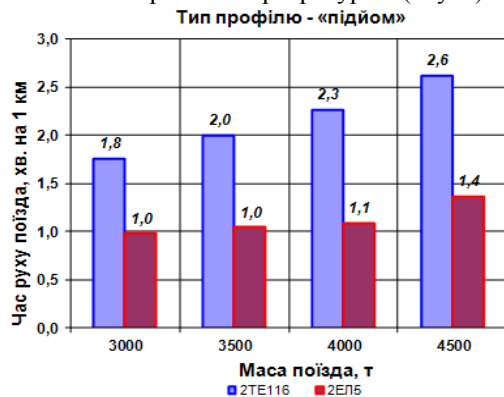


Рис. 9. Час руху вантажного поїзда віднесений до 1 км

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Курган М. Б. Ефективність впровадження нових типів електропоїздів [Текст] / М. Б. Курган, Н. П. Хмелевська, С. Ю. Байдак / Електрифікація транспорту – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2014. – Вип. 8. – С. 93-98.
2. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
3. Гребенюк П. Т. Тяговые расчеты: Справочник [Текст] / П. Т. Гребенюк, Долганов А. Н., Скворцова А. И. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
4. Корженевич И. П. Оценка расхода топлива или электроэнергии через механическую работу локомотива [Текст] // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – Вип. 29. – С. 88-90.
5. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України [Текст]: (ЦД/0036). – К., - 2002. – 376 с.

© Курган М. Б. та ін., 2015

## Висновки

Розрахунки пропускної спроможності виконані для перегонів у вигляді «ями», «горба» і «підйому-спуску» підтверджують ефективність впровадження електричної тяги незалежно від обрисів профілю, якщо мають місце круті підйоми з ухилами 8-12 % на яких вантажні поїзди рухаються зі сталою швидкістю.

2. За рахунок збільшення маси вантажних поїздів при впровадженні нових типів електропоїздів і зростання середньої швидкості руху в 1,5-2,0 рази ефективність досягається також за рахунок скорочення парку електропоїздів у порівнянні з тепловозною тягою.

3. Збільшення швидкості руху на крутих підйомах у порівнянні з тепловозною тягою призводить до скорочення часу руху по перегонах, що має велике значення для підвищення пропускної спроможності, перш за все, однокільних ділянок.

4. При впровадженні електропоїздів нового покоління слід також враховувати, що їхня потужність не використовується в повній мірі із-за обмеження норми маси довжиною прийнятно-відправних колій, а швидкості руху часто обмежуються станом колійного господарства перегонів і станцій [6, 7]. Отже, на напрямках (рис. 1-3) паралельно електрифікації необхідно виконувати роботи з модернізації залізничної колії, перевлаштування плану лінії для усунення обмежень швидкості за параметрами кривих.

Надійшла до друку 15.06.2015.

## REFERENCES

1. Kurhan M. B., Khmelevska N. P., Baidak S. Yu. Efektyvnist' vprovadzhennya novykh typiv elektrovoziv. Scientific journal Electrification of transport. Dnipropetrovskyy Natsional'nyy Universytet Zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana, 2014, issue 8, pp. 93-98.
2. Pravila tyagovyih raschetov dlya poezdnoy raboty. Moscow, Transport, 1985, 287 p.
3. Grebenyuk P. T. Tyagovyye raschety: Spravochnik. Moscow, Transport, 1987, 272 p.
4. Korzhenevich I. P. Otsenka raskhoda toplyva uly elektroenerhiy cherez mekhanicheskuyu rabotu lokomotyva. Visnyk Dnipropetrovskoho Natsionalnoho Universytetu Zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana, 2009, issue 29, pp. 88-90.
5. Instruktsiya z rozrakhunku nayavnoyi propusknoyi spromozhnosti zaliznyts' Ukrayiny. Kyiv,



6. Корженевич І. П. Вплив підвищення швидкості руху поїздів на витрати енергоресурсів [Текст] / І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Ю. С. Бараш, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – Вип. 20. – С. 233-239.

7. Проведення досліджень та оцінка економічної ефективності усунення обмеження швидкості за параметрами і станом залізничної колії: Звіт про НДР [Текст] / Дніпропетр. нац. ун-тет залізн. трансп.; Договір №78/2011-Цтех-142/2011-ЦЮ від 12.09.2011 р. Номер держреєстрації 0111U008909. Д., 2011. – 64 с.

2002, 376 p.

6. Korzhenevich I. P., Kurgan M. B., Barash Yu. S., Kurgan D. M. Vpliv pidvischennya shvidkosti ruhu poyizdiv na vitrati energoresursiv. Visnyk Dnipropetrovskoho Natsionalnoho Universytetu Zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana, 2008, issue 20, pp. 233-239.

7. Provedennya doslidzhen' ta otsinka ekonomichnoyi efektyvnosti usunennya obmezheniya shvydkosti za parametry i stanom zaliznychnoyi kolyi. Dnipropetrovskyy Natsional'nyy Universytet Zaliznychnoho transportu imeni imeni akademika V. Lazariana, 2011, 64 p.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

В даній статті на прикладі залізничних напрямків з тепловозною тягою, що зв'язують Україну з Білоруссю й Польщею, досліджується ефективність їх електрифікації для підвищення пропускної спроможності. Для досягнення мети дослідження проаналізовано ряд проектів, згідно яких планується електрифікація існуючих одноколіїних залізниць. Показано, як технічне оснащення ділянок залізниці впливає на експлуатаційні показники. За результатами розрахунків зроблено висновок щодо впливу обрису поздовжнього профілю, величини ухилів, типу електровозів і маси поїздів на ефективність електрифікації одноколіїних залізниць.

**Ключові слова:** електрифікація; енергоємність; модернізація колії; обмеження швидкості; змінний струм.

**УДК 621.331.3**

**Н. Б. КУРГАН, Н. П. ХМЕЛЕВСКАЯ, С. Ю. БАЙДАК (ДНУЖТ)**

Кафедра «Проектирование и строительство дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 373-15-48, эл. почта [kunibor@mail.ru](mailto:kunibor@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-8182-7709](http://orcid.org/0000-0002-8182-7709)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ОДНОПУТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

В данной статье на примере железнодорожных направлений с тепловозной тягой, связывающие Украину с Белоруссией и Польшей, исследуется эффективность их электрификации для повышения пропускной способности. Для достижения цели исследования проанализирован ряд проектов, по которым планируется электрификация существующих однопутных железных дорог. Показано, что эксплуатационные показатели зависят от технического оснащения железной дороги. По результатам расчетов сделан вывод о влиянии очертания продольного профиля, величины уклонов, типов электровозов и массы поездов на эффективность электрификации однопутных железных дорог.

**Ключевые слова:** электрификация; энергоёмкость; модернизация пути; ограничения скорости; переменный ток; эффективность.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

**UDC 621.331.3**

**M. B. KURHAN, N. P. KHMELEVSKA, S. YU. BAIDAK (DNURT)**

Department of Engineering And Construction Of Roads, Dnipropetrovsk National University Of Railway Transport Named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 373-15-48, e-mail [kunibor@mail.ru](mailto:kunibor@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-8182-7709](http://orcid.org/0000-0002-8182-7709)

## RESEARCH EFFICIENCY ELECTRIFICATION SINGLE TRACK RAILWAY TO INCREASE CAPACITY

In this article, the example of the railway routes with diesel traction connecting Ukraine, Belarus and Poland, studied the effectiveness of their electrification. To achieve the objectives of the study analyzed a number of projects, which are planned for the electrification of the existing single-track railways. It is shown that the performance indicators depend on the technical equipment of the railway. The study concluded that the effect of the contour of the longitudinal profile, slope, type and weight of trains affect the efficiency of a single-track railway electrification.

**Keywords:** electrification; energy consumption; modernization of the way; the speed limit; alternating current; effectiveness.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

© Курган М. Б. та ін., 2015