

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./факс +38 (056) 373 15 48, ел. пошта [kunibor@mail.ru](mailto:kunibor@mail.ru)

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

### Вступ

Потреби економіки держави та попит населення вимагають сучасного рівня транспортного забезпечення, впровадження нових технологій перевезень, рухомого складу нового покоління з більш високим рівнем якісних, технічних та економічних показників експлуатації.

На сьогодні пропускна спроможність окремих ділянок та напрямків залізниць не задовольняє вимогам щодо обсягів та швидкості вантажних перевезень, а суміщений рух вантажних і пасажирських поїздів по одних і тих же ділянках стримує впровадження швидкісного руху.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є реалізація Програми електрифікації залізниць України на 2011-2016 рр., що дозволить підвищити економічну ефективність залізничного транспорту, зменшити негативний вплив на навколишнє природне середовище, забезпечити високі соціальні стандарти транспортних послуг [1].

Програма передбачає електрифікацію 1562 км експлуатаційної довжини залізничних колій на ділянках, що входять у напрямки розмежування руху пасажирських і вантажних поїздів та на ділянках впровадження швидкісного руху. Сума інвестицій складе понад 17 млрд. грн., а річний економічний ефект капітальних вкладень з урахуванням прогнозу росту цін на енергоносії очікується 2,1 млрд. грн.

Що стосується рухомого складу, то ситуація надто складна, близько 70% магістральних електровозів вже пододало призначений виробником 30-річний термін їх служби. Активна електрифікація залізничних ліній, що проводиться Укрзалізницею, потребує додаткового збільшення експлуатаційного парку електровозів, особливо змінного струму.

В рамках виконання «Програми оновлення локомотивного парку залізниць України на 2012-2016 рр.» [2] заплановано поставити 230 електровозів серії 2ЕЛ4 на Донецьку залізницю, 70 електровозів 2ЕЛ5 на Одеську залізницю, 50 електровозів 2ЕС10 (7 на Донецьку і 43

на Львівську) і 110 електровозів ВЛ11М/6 на Придніпровську залізницю (рис. 1).

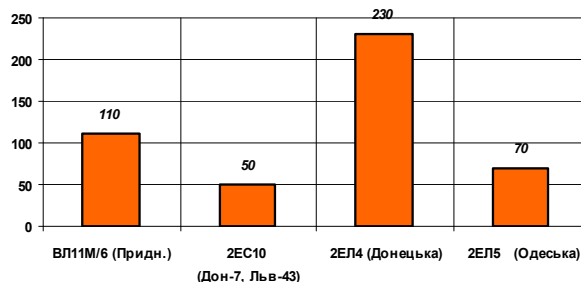


Рис. 1. План поставок електровозів

Вантажні електровози постійного струму ВЛ11 М/6 потужністю 4600 кВт та конструкційною швидкістю 100 км/год виробляє Тбіліський електровозобудівний завод (ТЕВЗ).

ВАТ «ХК «Луганськтепловоз» виготовляє магістральні вантажні електровози постійного струму 2ЕЛ4 потужністю 6400 кВт і конструкційною швидкістю 120 км/год для заміни електровозів ВЛ8 і ДЕ1.

Для заміни вантажних електровозів ВЛ80 «ХК «Луганськтепловоз» виготовляє електровози змінного струму 2ЕЛ5 потужністю тривалого режиму 6120 кВт і конструкційною швидкістю 120 км/год.

Представляється доцільним дослідити, за яких умов слід впроваджувати електричну тягу замість тепловозної, а також ефективність заміни застарілих ВЛ8 новими 2ЕЛ4 і ВЛ80 на 2ЕЛ5.

### Методика дослідження

Розглянемо тягові характеристики вище названих локомотивів. На рис. 2-5 наведено порівняння тягових характеристик існуючого локомотивного парку (тепловоз 2ТЕ116 та електровози ВЛ8, ВЛ80) та перспективних локомотивів (електровози 2ЕЛ4 та 2ЕЛ5), а також криві повного питомого опору руху при різних ухилах з розрахунковою масою поїзда 3000 т.

Швидкість руху поїзда на достатньої довжини елементі поздовжнього профілю залежить від типу локомотива, маси поїзда і загального опору руху. Для виявлення сталої швидкості на різних за крутизною елементах поздовжнього профілю скористаємося сполученими графіка-

ми  $F_k(V)$  – тягова характеристика локомотива і  $W(V)$  – крива загального опору руху.

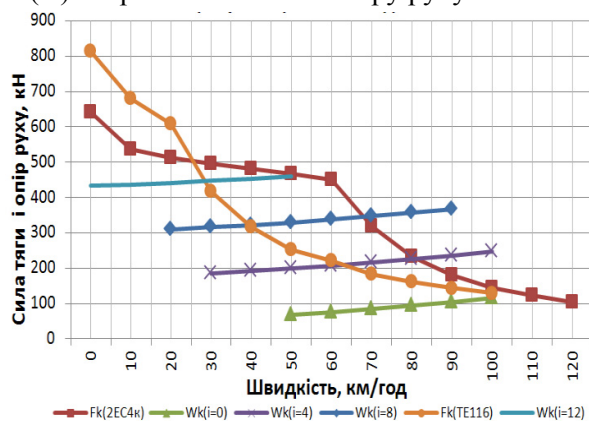


Рис. 2. Локомотиви 2ТЕ116, 2ЕЛ4

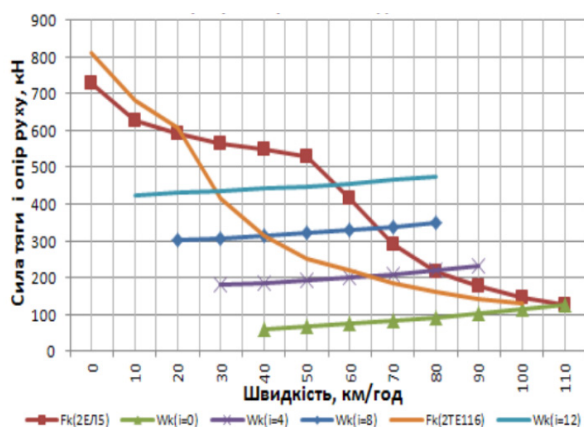


Рис. 3. Локомотиви 2ТЕ116, 2ЕЛ5

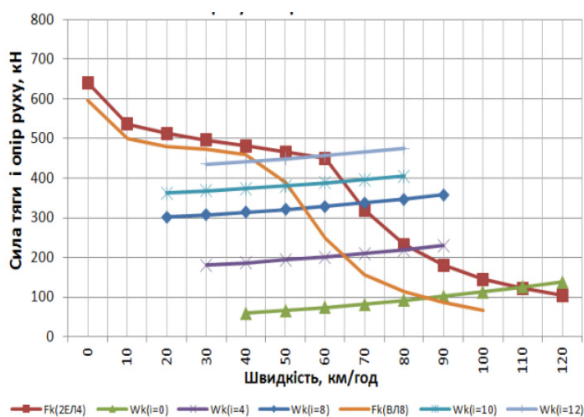


Рис. 4. Локомотиви ВЛ8, 2ЕЛ4

Загальний опір руху складається з основного опору руху  $W_o$ , опору від ухилу  $W_i$  і опору від кривизни колії  $W_r$  [1]:  $W = W_o + W_i + W_r$ .

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 ухилів 8, 12 і 14 ‰ наведені в табл. 1.

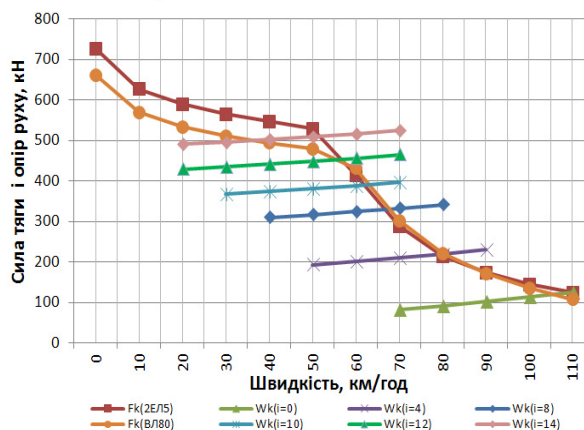


Рис. 5. Локомотиви ВЛ80, 2ЕЛ5

Таблиця 1

Стала швидкість на крутих підйомах для різних локомотивів

Ухил, ‰	Стала швидкість, км/год			Зростання швидкості, разів	
	2ТЕ116	2ЕЛ4	2ЕЛ5	2ТЕ116-2ЕЛ4	2ТЕ116-2ЕЛ5
8	40	70	67	1.75	1.68
12	28	60	56	2.14	2.00
	<b>ВЛ8</b>	<b>2ЕЛ4</b>		<b>ВЛ8-2ЕЛ4</b>	
8	55	70		1.27	
12	40	60		1.50	
	<b>ВЛ80</b>		<b>2ЕЛ5</b>		<b>ВЛ80-2ЕЛ5</b>
8	67		67		1.00
12	55		57		1.04
14	40		52		1.30

З аналізу рис. 2-5 і табл. 1 випливає, що вантажний поїзд однакової маси 3000 т з локомотивом 2ЕЛ4 і 2ЕЛ5 рухається з швидкістю в 1,7 і 2 рази швидше на ухилах 8 і 12‰ відповідно у порівнянні з тепловозною тягою.

Заміна існуючих електровозів ВЛ8 на нові 2ЕЛ4 дає можливість за тих же умов збільшити швидкість в 1,3 і 1,5 рази відповідно на ухилах 8 і 12‰.

Заміна існуючих електровозів ВЛ80 на нові 2ЕЛ5 дає переваги тільки на підйомах більших за 12‰, що пояснюється співпаданням кривих сили тяги  $F_k(V)$  в діапазоні швидкостей 60-110 км/год (рис. 5). Так, при  $i=12$  ‰ стала швидкість зростає на 5%, при  $i=14$  ‰ – на 30%.

Для визначення факторів, які впливають на енергетичні витрати, розглянемо рівняння руху поїзда

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

У виразі (1)  $F_k$  – сила тяги локомотива;  $m$  – маса поїзда;  $a$  – прискорення поїзда;  $W_o$  – сила основного опору руху;  $W_i, W_r$  – сили додаткового опору руху відповідно від ухилів і кривизни колії.

Значення основного і додаткових опорів руху, визначаються для кожного рухомого складу емпірично за даними [3, 4].

Аналізуючи різні технології енергозбереження [5, 6], робимо висновок, що одним із основних шляхів є зменшення витрат на тягу поїздів, тобто зменшення складових частин, що входять до формули (1).

Витрати на тягу поїздів залежать від багатьох факторів серед яких одним з основних можна вважати режим ведення поїзда. Зміна режиму веде до різної механічної роботи сили тяги локомотива, яка залежить від технічного стану верхньої будови колії, параметрів поздовжнього профілю, плану лінії тощо. І якщо профіль залізниці практично не змінюється при проведенні модернізації залізничної колії, то параметри плану лінії корегуються з метою підвищення швидкості руху поїздів [7].

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

$$R_m = \int_l F_k ds, \quad (2)$$

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

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.

Визначивши механічну роботу локомотива  $R_m$  і врахувавши коефіцієнт корисної дії електровоза  $\eta$ , визначаються витрати електроенергії на тягу поїзда [5]:

$$E = \frac{R_m}{\eta},$$

або

$$E = \left( \int_{l_1} W_o ds + \int_{l_2} W_i ds + \int_{l_3} W_r ds + \int_{l_4} mads \right) \frac{1}{\eta} \quad (3)$$

В роботі було досліджено, як змінюється енергоємність вантажного поїзда, що рухається на різних за крутизною підйомів ділянках залізниці. Для порівнянності результатів була прийнята в одному варіанті однакова маса вантажного поїзда 3000 тонн, в іншому – маса поїзда визначалась потужними можливостями локомотива (див. табл. 2).

Як впливає з графіків (рис. 2-5) і підтверджується результатами тягових розрахунків для перегону, що має обрис затяжного підйому, витрати електроенергії при зростанні швидкості теж збільшуються (табл. 2). Але при цьому в 1,4-1,5 рази зменшується час руху вантажного поїзда, що має велике значення для підвищення пропускної спроможності, перш за все, одноколійних ділянок.

Таблиця 2

**Тягово-енергетичні розрахунки**

Найбільший ухил, %	Напрямок руху	Довжина, м	$V_{max}$ , км/год	$V_{сер}$ , км/год	Витрати елект, кВт-год	Мех роб., ткм	Робота гальм, ткм	Час руху, хв	$A_o^*$ , кг/км	Вартість, грн/ 1 км	Кількість поїздів
<b>2ТЕ116, Q = 3500 т</b>											
i=12	непарн.	14500	32	30	451,7	584,5	30,4	28,76	31,15	<b>186,9</b>	4490
	парний	14500	86	76	48,7	64,3	372,6	11,52	3,36	<b>20,2</b>	
<b>2ЕЛ4к, Q = 3350 т</b>											
i=12	непарн.	14500	56	46	2884,9	749,6	45,8	18,91	198,96	<b>159,2</b>	4691
	парний	14500	85	77	247,5	63,9	498,5	11,32	17,07	<b>13,7</b>	
<b>2ЕЛ5к, Q = 3700 т</b>											
i=12	непарн.	14500	45	37	3164,8	791,9	48,4	23,54	218,26	<b>174,6</b>	4247
	парний	14500	85	77	261,1	67,4	544,5	11,37	18,01	<b>14,4</b>	
<b>2ТЕ116, Q = 3500 т</b>											
i=12	непарн.	14500	25	24	570,2	731,3	28,4	36,42	39,32	<b>235,9</b>	4490
	парний	14500	86	76	40,3	53,1	516,9	11,47	2,78	<b>16,7</b>	

Найбільший ухил, ‰	Напрямок руху	Довжина, м	$V_{max}$ , км/год	$V_{сер}$ , км/год	Витрати електр., кВт·год	Мех роб., ткм	Робота гальм., ткм	Час руху, хв	$A_0^*$ , кг/км	Вартість, грн/ 1 км	Кількість поїздів
<b>2ЕЛ4к, Q = 3500 т</b>											
i=12	непарн.	14500	31	27	2572,9	724,0	18,5	32,52	177,44	<b>142,0</b>	4490
	парний	14500	90	76	212,1	65,1	533,7	11,44	14,63	<b>11,7</b>	
<b>2ЕЛ5к, Q = 3500 т</b>											
i=12	непарн.	14500	55	43	3017,6	775,1	45,6	20,30	208,11	<b>166,5</b>	4490
	парний	14500	85	77	253,9	65,5	518,1	11,34	17,51	<b>14,0</b>	
<b>2ТЕ116, Q = 4500 т</b>											
i=9	непарн.	14500	26	24	564,5	724,3	30,1	36,04	38,93	<b>233,6</b>	3492
	парний	14500	86	75	283,3	87,2	466,1	11,63	19,54	<b>117,2</b>	
<b>2ЕЛ4к, Q = 4500 т</b>											
i=9	непарн.	14500	32	27	2559,7	721,6	43,3	32,57	176,53	<b>141,2</b>	3492
	парний	14500	86	75	283,3	87,2	466,1	11,63	19,54	<b>15,6</b>	
<b>2ЕЛ5к, Q = 4500 т</b>											
i=9	непарн.	14500	54	41	3055,3	778,3	78,5	21,45	210,71	<b>168,6</b>	3492
	парний	14500	86	75	338,2	87,6	468,6	11,53	23,32	<b>18,7</b>	
<b>ВЛ8, Q = 3000 т</b>											
i=12	непарн.	14500	46	38	2010	650,0	37,9	22,73	138,62	<b>110,9</b>	5238
	парний	14500	89	76	150,3	48,6	440,0	11,40	10,37	<b>8,3</b>	
<b>2ЕЛ4к, Q = 3000 т</b>											
i=12	непарн.	14500	57	44	2135,5	674,1	56,9	19,65	147,28	<b>117,8</b>	5238
	парний	14500	85	77	194,8	59,8	451,9	11,33	13,43	<b>10,7</b>	
<b>2ЕЛ4к, Q = 3200 т</b>											
i=12	непарн.	14500	47	38	2270,6	693,4	40,3	23,13	156,59	<b>125,3</b>	4911
	парний	14500	85	77	201,2	61,7	478,8	11,36	13,88	<b>11,1</b>	
<b>ВЛ8, Q = 4000 т</b>											
i=9	непарн.	14500	44	34	2082,7	670,5	42,3	25,54	143,63	<b>114,9</b>	3929
	парний	14500	86	75	205,7	66,6	405,2	11,64	14,19	<b>11,3</b>	
<b>2ЕЛ4к, Q = 4000 т</b>											
i=9	непарн.	14500	50	39	2241,7	689,9	44,6	22,49	154,60	<b>123,7</b>	3929
	парний	14500	86	75	265,5	81,8	422,1	11,53	18,31	<b>14,6</b>	
<b>2ЕЛ4к, Q=4200 т</b>											
i=9	непарн.	14500	43	34	2348,5	702,0	44,5	25,54	161,97	<b>129,6</b>	3741
	парний	14500	86	75	272,3	83,8	438,6	11,57	18,78	<b>15,0</b>	
<b>ВЛ80, Q = 3350 т</b>											
i=12	непарн.	14500	45	37	2697,5	718,8	43,9	23,48	186,03	<b>148,8</b>	4691
	парний	14500	85	77	231,0	62,9	497,4	11,37	15,93	<b>12,7</b>	
<b>2ЕЛ5к, Q = 3350 т</b>											
i=12	непарн.	14500	56	46	2884,9	749,6	45,8	18,91	198,96	<b>159,2</b>	4691
	парний	14500	85	77	247,5	63,9	498,5	11,32	17,07	<b>13,7</b>	
<b>ВЛ80, Q = 4300 т</b>											
i=9	непарн.	14500	45	36	2713,7	722,1	48,0	24,32	187,15	<b>149,7</b>	3654
	парний	14500	86	75	309,7	84,4	449,0	11,56	21,36	<b>17,1</b>	
<b>2ЕЛ5к, Q = 4300 т</b>											
i=9	непарн.	14500	56	44	2931,5	757,0	77,6	19,75	202,17	<b>161,7</b>	3654
	парний	14500	86	76	330,5	85,6	449,8	11,50	22,79	<b>18,2</b>	

Примітка: \*) для тепловозної тяги – кг/км, для електричної – кВт·год/км

## Висновки

Вартість електроенергії на тягу поїздів в середньому 1,3-1,5 рази менша ніж вартість дизельного палива при тепловозній тязі (в залежності від співвідношення вартості 1 тонни палива і 1000 кВт-год електроенергії). Крім того, економія досягається за рахунок збільшення маси вантажних поїздів при впровадженні нових, більш потужних типів електровозів. Отже, один і той же обсяг перевезень можна освоїти пар-

ком електровозів меншим, ніж парк тепловозів. Собівартість перевезень також не на користь існуючого рухомого складу.

При встановленні ефективності електровозів 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.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Програма електрифікації залізниць України на 2011-2016 рр. / Затв. наказом Укрзалізниці від 10.06.2011 р. № 274-Ц. – К., 2011.
2. Програма оновлення локомотивного парку залізниць України на 2012-2016 рр. / Затв. постановою Кабінету Міністрів України від 01.08.2011 р. №840. – К., 2011.
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
4. Гребенюк, П. Т. Тяговые расчеты: Справочник / Под ред. П. Т. Гребенюка. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
5. Мутинштейн Л. А. Метод постоянных перегонных скоростей для оценки энергозатрат на тягу поездов / Л. А. Мутинштейн, А. В. Лохач, С. А. Виноградов, Т. В. Виноградова, И. И. Мерман // Вестник ВНИИЖТ. – № 4. – 2000. – С. 16-19.
6. Корженевич І. П. Вплив підвищення швидкості руху поїздів на витрати енергоресурсів / 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. Курган М. Б. Системний підхід до вирішення задачі енергозбереження в колійному господарстві / М. Б. Курган, С. Ю. Байдак, Н. П. Хмелевська // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 11 червня – 14 липня 2013 р.) – Д.: ДНУЗТ, 2013. – С. 59-60.

Надійшла до друку 22.10.2014.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

## REFERENCES

1. *Prohrama elektryfikatsiyi zaliznyts' Ukrayiny na 2011-2016 rr.* [Program of electrification the railways of Ukraine for 2011-2016]. Kyiv, 2011.
2. *Prohrama onovlennya lokomotyvnoho parku zaliznyts' Ukrayiny na 2012-2016 rr.* [Locomotive fleet renewal program railways of Ukraine for 2012-2016]. Kyiv, 2011.
3. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* [Terms traction calculations for train operation]. Moscow, Transport Publ., 1985. 287 p.
4. Grebenyuk P. T. *Tyagovye raschety: Spravochnik* [Traction calculations: Guide]. Moscow, Transport Publ., 1987. 272 p.
5. Mutinshteyn L. A., Lohach A. V., Merman I. I., Vinogradov S. A., Vinogradova T. V. *Metod postoyannykh peregonnykh skorostey dlya otsenki energozatrat na tyagu poezdov* [Constant boiling speeds to assess energy for traction]. – *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT], 2000, issue 4, pp. 16-19.
6. Korzhenevich I. P., Kurgan M. B., Barash Yu. S., Kurgan D. M. *Vpliv pidvischennya shvidkosti ruhu poyizdiv na vitrati energoresursiv* [The impact of increasing the speed of trains on energy costs]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 20, pp. 233-239.
7. Kurhan M. B., Baidak S. Yu., Khmelevska N. P. *Systemnyy pidkhid do vyrishennya zadachi enerhozberezhennya v koliynomu hospodarstvi* [The systems approach to solving the problem of energy conservation in railroad facilities]. *Materialy IV Mizhnarodnoyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi "Enerhozberezhennya na zaliznychnomu transporti i v promyslovosti (Volovets', 11.06 – 14.06.2013)"* [Proc. of the 4<sup>th</sup> Int. Scientific and Practical Conf. "Energy efficiency on railway transport and in industry"]. Dnipropetrovsk, 2013, pp. 59-60.

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

В даній статті розглянуто питання зміни енергоємності вантажного поїзда, що рухається на різних за крутизною підйомів ділянках залізниці. Досліджуються умови за яких слід впроваджувати електричну тягу замість тепловозної, а також ефективність заміни застарілого парку електровозів як змінного, так і постійного струму. Для досягнення мети дослідження проаналізовано парк локомотивів, які експлуатуються на даний час, використано математичне моделювання руху поїздів та визначено основні тягово-енергетичні показники для різних серій локомотивів. За результатами розрахунків зроблено висновок про доцільність переведення магістральних ліній (особливо одноколіїних) на електричну тягу та умови, за яких впровадження сучасних локомотивів ефективне.

**Ключові слова:** електрифікація, тягова характеристика, енергоємність, постійний струм, змінний струм.

УДК 629.423.1.016.3

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./факс +38 (056) 373 15 48, эл. почта [kunibor@mail.ru](mailto:kunibor@mail.ru)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

В данной статье рассмотрены вопросы изменения энергоёмкости грузового поезда, движущегося на разных по крутизне подъёмов участках железной дороги. Исследуются условия, при которых следует внедрять электрическую тягу вместо тепловозной, а также эффективность замены устаревшего парка электровозов как переменного, так и постоянного тока. Для достижения цели исследования проанализированы парк локомотивов, которые эксплуатируются в настоящее время, использовано математическое моделирование движения поездов и определены основные тягово-энергетические показатели для различных серий локомотивов. По результатам расчетов сделан вывод о целесообразности перевода магистральных линий (особенно однопутных) на электрическую тягу и условия, при которых введение современных локомотивов эффективно.

**Ключевые слова:** электрификация, тяговая характеристика, энергоёмкость, постоянный ток, переменный ток.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

UDC 629.423.1.016.3

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

Department «Engineering And Construction Of Roads», Dnipropetrovsk National University Of Railway Transport Named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, Tel./Fax +38 (056) 373 15, e-mail [kunibor@mail.ru](mailto:kunibor@mail.ru)

## IMPLEMENTATION OF NEW ELECTRIC LOCOMOTIVES

This article examines the questions of energy intensity of freight train moving at different sites on the steepness of the ascent of the railway. We investigate the conditions under which should be introduced in place of diesel electric propulsion, as well as the effectiveness of the replacement of obsolete electric locomotives both AC and DC. To achieve the objectives of the study analyzed the fleet of locomotives that operate at the moment, used mathematical modeling of trains and the main trailer energy indicators for the various series of locomotives. The calculations concluded feasibility translation trunk lines (especially the single track) for electric traction and the introduction of modern locomotives

**Keywords:** electrification, traction characteristics, energy consumption, direct current, alternating current.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Panasenko M. V.*