

УДК 656.224.022.846

А. М. АФАНАСОВ – д. т. н., професор, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, afanasof@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4609-2361

С. В. АРПУЛЬ – к.т.н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, arpul@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3698-2627

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ВАНТАЖНИХ ПОЇЗДІВ

Вступ

Енергозбереження на залізничному транспорті в умовах ринкової економіки є одним з основних пріоритетів науково-технічної політики Укрзалізниці. Застосування тиристорних напівпровідникових випрямлячів ще в минулому столітті дало можливість створити електровози з плавним регулюванням напруги на колекторних тягових двигунах пульсуючого струму (ВЛ80^Р, ВЛ85). На наступний час такий електрорухомий склад остається досить ефективним та конкурентоспроможним, а тому успішно експлуатується на залізницях України (2ЭС5К, 2ЕЛ5). Накопичений досвід показує, що застосування плавного багатозонного регулювання напруги на тягових двигунах дозволяє підвищити як тягові, так й енергетичні показники електровозів в режимах тяги та рекуперативного гальмування, але показники енергетичної ефективності, які фіксуються в реальних умовах експлуатації цих електровозів, часто не відповідають сучасним вимогам [1]. Це може бути результатом використання нераціональних режимів тяги з недостатньо високими значеннями коефіцієнтів потужності та корисної дії електровозів, що, в свою чергу, підвищує загальні та питомі витрати електроенергії на тягу поїздів [2, 3].

Метою даного аналізу було визначення загальних закономірностей впливу режимів тяги та характеристик перевізного процесу на загальні та питомі витрати електроенергії на тягу вантажних поїздів. Для проведення даного аналізу було проведено бага-

товаріантні тягові розрахунки для електровозу 2ЭС5К на ділянці «Знам'янка-Сортувальна – Одеса-Сортувальна» Одеської залізниці в обох напрямках (протяжність дільниці – 385 км).

Постановка задачі дослідження

Задачі дослідження:

- отримання залежності витрат електроенергії на тягу від загального часу руху на дільниці та технічної швидкості;
- отримання залежності витрат електроенергії на власні потреби від загального часу руху на дільниці та технічної швидкості;
- визначення можливості зменшення загальних витрат електроенергії на тягу поїздів зменшеної маси за рахунок відключення частини тягових двигунів.

Методика розрахунків

Повні витрати електроенергії визначаються як

$$A = A_T + A_{ВП},$$

де A , A_T , $A_{ВП}$ – повні витрати, витрати на тягу та на власні потреби відповідно.

Відносні відхилення витрат електроенергії (повні ΔA , на тягу ΔA_T та на власні потреби $\Delta A_{ВП}$) визначаються за виразами:

$$\Delta A = \frac{(A_i - A_6)}{A_6} \cdot 100\% ;$$
$$\Delta A_{Ti} = \frac{(A_{Ti} - A_{T6})}{A_{T6}} \cdot 100\% ;$$

$$\Delta A_{\text{ВП}i} = \frac{(A_{\text{ВП}i} - A_{\text{ВП}6})}{A_{\text{ВП}6}} \cdot 100\%$$

де A_6 – витрати електроенергії для базисного варіанту розрахунку; i – варіант розрахунку.

Питомі витрати електроенергії (повні a , на тягу a_T та на власні потреби $a_{\text{ВП}}$) визначаються за виразами:

$$a_i = \frac{10^4 A_i}{(P + Q)S};$$

$$a_{Ti} = \frac{10^4 A_{Ti}}{(P + Q)S};$$

$$a_{\text{ВП}i} = \frac{10^4 A_{\text{ВП}i}}{(P + Q)S},$$

де S – довжина дільниці; P, Q – маса електровоза та состава відповідно.

Відносні значення питомих витрат електроенергії (на тягу a'_T та на власні потреби $a'_{\text{ВП}}$) визначаються за виразами:

$$a'_{Ti} = \frac{a_{Ti}}{a_i} \cdot 100\%;$$

$$a'_{\text{ВП}i} = \frac{a_{\text{ВП}i}}{a_i} \cdot 100\%,$$

де a_i – питомі витрати електроенергії для i -го варіанту розрахунку.

Тягові розрахунки виконувались за стандартною методикою [4, 5]. При виконанні тягових розрахунків використовувалася тягова характеристика електровоз 2ЭС5К, представлена на рис. 1, а для визначення витрат електричної енергії струмова характеристика електровоза (див. рис. 2).

Витрати електричної енергії на власні потреби приймалися рівними $P_{\text{ВП}} = 4,4$ кВт·год/хв для двох секцій електровоза та $P_{\text{ВП}} = 2,2$ кВт·год/хв для однієї секції. Напруга контактної мережі приймалася незмінною, рівною 25 кВ. Масу електровозу прийнято 192 т.

1 Результати розрахунків на напрямку «Знам'янка-Сортувальна – Одеса-Сортувальна»

В табл. 1 представлено результати тягових розрахунків на дільниці «Знам'янка-Сортувальна – Одеса-Сортувальна» для вантажного поїзда з електровозом 2ЭС5К. При виконання тягових розрахунків масу состава було прийнято рівною 5000 т. Розрахунки виконано для різних значень часу руху поїзда від 6,24 год до 10 год, цей діапазон зміни часу руху поїзда є реальним для даної дільниці.

В табл. 1 використовуються наступні позначення: t – час руху поїзда; V_T – технічна швидкість руху поїзда; S – довжина дільниці; i – варіант розрахунку від 1 до 10.

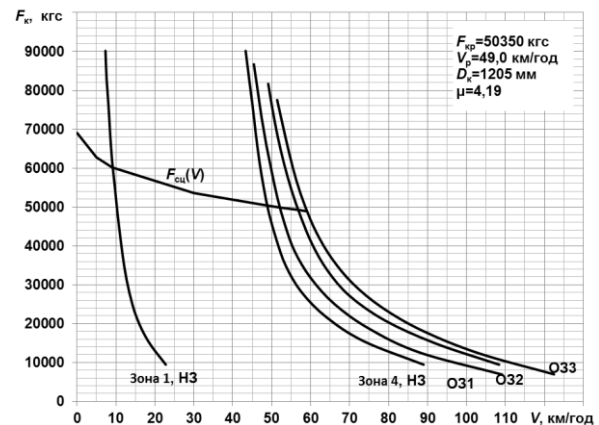


Рис. 1. Тягова характеристика електровоза 2ЭС5К

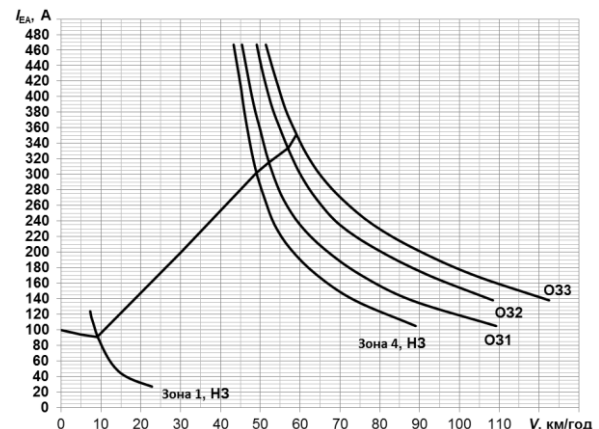


Рис. 2. Струмова характеристика електровоза 2ЭС5К (активна складова повного струму)

Аналіз даних розрахунків показує, що при зменшенні часу руху поїзда з 7 год. 54 хв. до 6 год. 14 хв. витрати електроенергії на тягу збільшуються приблизно на 11 %, а витрати електроенергії на власні потреби зменшуються на 21 %. При цьому загальні витрати електричної енергії на даній ділянці збільшуються на 7,9 % (дивись табл. 1). При виконанні аналізу приведених результатів в якості базисного значення витрат електричної енергії було прийнято дані для 6-го варіанту розрахунку, який наближений до графіку руху вантажного поїзда з часом руху 7 год. 47 хв. На рис. 3 наведено залежності відносних змін витрат електроенергії від часу руху поїзда на даній ділянці за обраним напрямком.

Рис. 4 ілюструє залежність питомих витрат електричної енергії на вказаній вище ділянці від технічної швидкості руху поїзда.

Залежність питомих витрат електроенергії від технічної швидкості на напрямку «Знам'янка-Сортувальна – Одеса-Сортувальна» наведено на рис. 5. На рисунку приведена прогнозована крива питомих витрат електроенергії, яка побудована за формулою

$$a(V_T) = 0,0012 \cdot V_T^2 + 0,3669 \cdot V_T + 76,202.$$

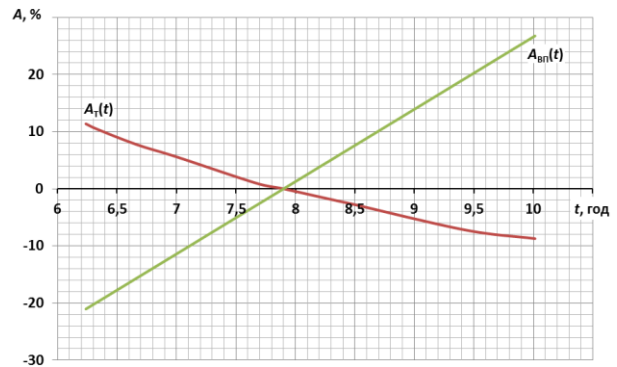


Рис. 3. Залежності відносних відхилень витрат електроенергії від часу руху на ділянці «Знам'янка-Сортувальна – Одеса-Сортувальна»

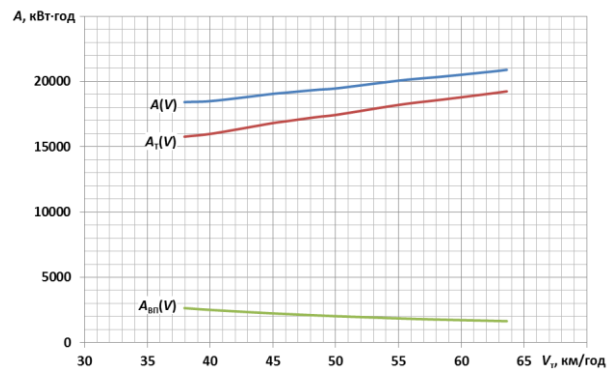


Рис. 4. Залежності витрат електроенергії від технічної швидкості на ділянці «Знам'янка-Сортувальна – Одеса-Сортувальна»

Таблиця 1

**Результати розрахунку витрат електроенергії
на ділянці «Знам'янка-Сортувальна – Одеса-Сортувальна»**

Параметр	Варіант розрахунку									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t , год	6,24	6,32	6,66	7,01	7,66	7,90	8,35	8,49	9,43	10,01
V_T , км/год	63,6	62,5	58,6	55,2	50,1	48,5	45,8	45,0	40,3	38,0
S , км	385									
A , кВт·год	20892	20765	20382	20086	19480	19365	19123	19050	18523	18418
A_T , кВт·год	19245	19095	18624	18235	17457	17279	16919	16809	16033	15774
A_{BP} , кВт·год	1647	1670	1758	1851	2023	2086	2204	2241	2490	2644
ΔA , %	7,9	7,2	5,3	3,7	0,6	0,0	-1,2	-1,6	-4,3	-4,9
ΔA_T , %	11,4	10,5	7,8	5,5	1,0	0,0	-2,1	-2,7	-7,2	-8,7
ΔA_{BP} , %	-21,0	-19,9	-15,7	-11,3	-3,0	0,0	5,7	7,5	19,4	26,8
a , кВт·год/ 10^4 т·км	104,52	103,88	101,97	100,48	97,45	96,88	95,67	95,30	92,67	92,14
a_T , кВт·год/ 10^4 т·км	96,28	95,53	93,17	91,23	87,33	86,44	84,64	84,09	80,21	78,91
a_{BP} , кВт·год/ 10^4 т·км	8,24	8,35	8,80	9,26	10,12	10,43	11,03	11,21	12,45	13,23
a'_{BP} , %	7,88	8,04	8,63	9,21	10,39	10,77	11,53	11,76	13,44	14,35
a'_T , %	92,11	91,96	91,37	90,79	89,62	89,23	88,47	88,24	86,55	85,64

На рис. 6 наведено прогнозовану криву питомих витрат електричної енергії від часу руху поїзда. Дана залежність розрахована за формулою

$$a(V_T) = 0,5864 \cdot V_T^2 - 12,773 \cdot V_T + 161,21.$$

Пунктирними відрізками на рис. 5 та 6 показано параметри руху поїзда (швидкість, час та витрати електроенергії) для базового варіанту.

Дані рис. 7 показують розподіл відносних значень складових питомих витрат електричної енергії в залежності від технічної швидкості. Аналіз даних рис. 7 вказує на те, що зі збільшенням часу руху поїзда, тобто зі зменшенням технічної швидкості руху, будуть зростати витрати електроенергії на власні потреби, і навпаки, зменшення часу руху поїзда призводить до підвищення витрат енергії на тягу, так як суттєво збільшується аеродинамічна складова основного опору руху поїзда.

2 Результати розрахунків на напрямку «Одеса-Сортувальна – Знам'янка-Сортувальна»

Як показує аналіз маршрутів на напрямку «Одеса-Сортувальна – Знам'янка-Сортувальна», маса складів вантажних поїздів суттєво відрізняється в меншу сторону від мас складів на напрямку «Знам'янка-Сортувальна – Одеса-Сортувальна». Тому тягові розрахунки було виконано з масою состава, рівною 2400 т. З метою виявлення можливостей економії електроенергії було виконано тягові розрахунки для поїзда даної маси з використанням однієї та двох секцій електровоза 2ЭС5К.

Результати тягових розрахунків представлено в табл. 2. В даній таблиці наведено по п'ять варіантів розрахунків для поїзда з масою состава 2400 т з однією та двома секціями електровоза [6]. В табл. 2 прийнято такі ж позначення, як і в табл. 1, окрім позначення Δa , яке представляє собою відсоток зменшення витрат електроенергії при веденні поїзда однією секцією.

На рис. 8 та 9 представлено залежності складових витрат електричної енергії при тязі однією та двома секціями відповідно.

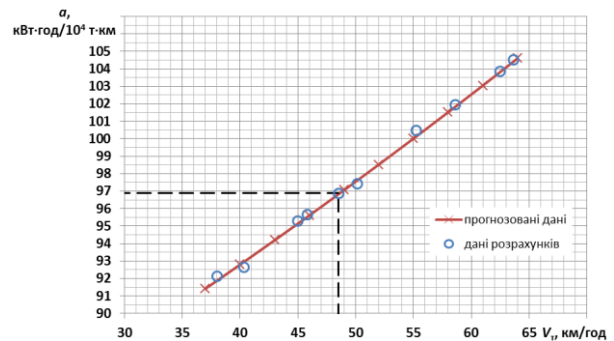


Рис. 5. Залежність питомих витрат електроенергії від технічної швидкості на дільниці «Знам'янка-Сортувальна – Одеса-Сортувальна»

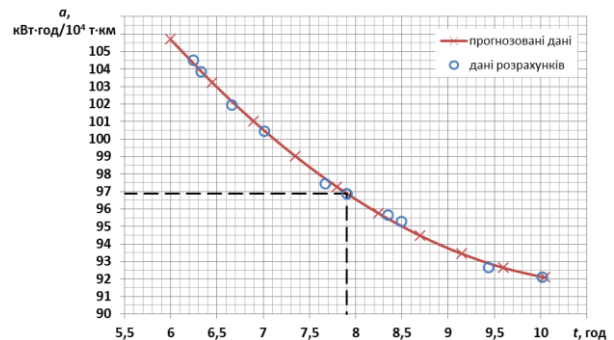


Рис. 6. Залежність питомих витрат електроенергії від часу руху поїзда на дільниці «Знам'янка-Сортувальна – Одеса-Сортувальна»

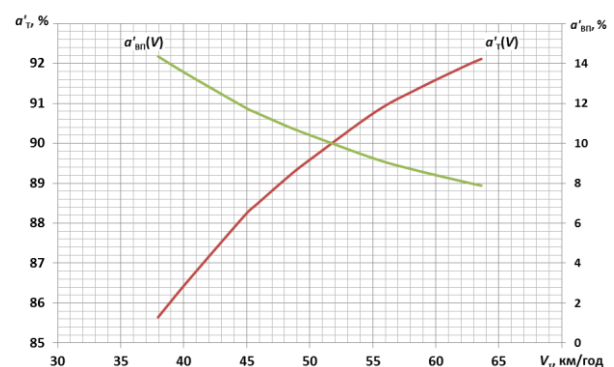


Рис. 7. Залежності відносних значень складових питомих витрат електроенергії від технічної швидкості руху поїзда на дільниці «Знам'янка-Сортувальна – Одеса-Сортувальна»

Аналіз даних, приведених на рис. 8 та 9, показує, що ведення поїзда однією секцією дає економію електроенергії на 2,8 % при технічній швидкості руху 42 км/год., яка є однаковою при тязі однією та двома секціями (варіант 4). При цьому витрати електроенергії на тягу зростають на 7,3 %, але суттєво, на 50 %, зменшуються витрати на власні потреби електровоза, що призводить до економії електроенергії в цілому.

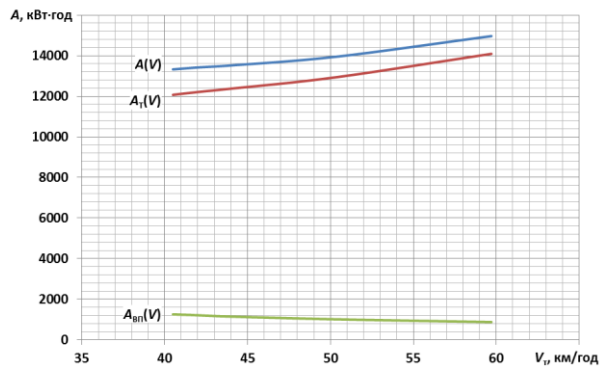


Рис. 8. Залежності витрат електроенергії від технічної швидкості на напрямку «Одеса-Сортувальна – Знам'янка-Сортувальна» при тязі однією секцією

На рис. 10 представлено залежність питомих витрат електроенергії при веденні состава масою 2400 т однією та двома секціями. Рис. 10 наочно ілюструє зменшення питомих витрат електричної енергії при використанні тільки однієї секції електровоза. Аналіз представлених на рис. 10 даних показує, що підвищення швидкості дає можливість зекономити більший відсоток електроенергії.

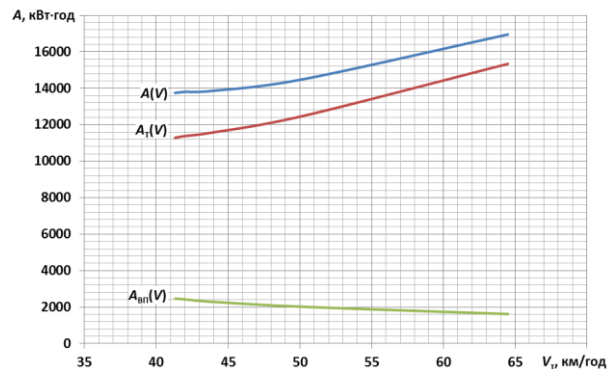


Рис. 9. Залежності витрат електроенергії від технічної швидкості на напрямку «Одеса-Сортувальна – Знам'янка-Сортувальна» при тязі двома секціями

Таблиця 2

**Результати розрахунків витрат електроенергії
на напрямку «Одеса-Сортувальна – Знам'янка-Сортувальна»**

Параметр	Варіант розрахунку									
	1 секція					2 секції				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
t , год	6,63	7,64	8,66	9,17	9,51	6,11	7,64	8,72	9,17	9,32
$V_{\text{сер}}$, км/ГОД	59,7	50,4	44,0	42,0	40,5	64,5	50,2	43,6	42,0	41,3
S , км	385									
A , кВт·год	14965	13953	13520	13420	13325	16948	14485	13835	13800	13742
A_T , кВт·год	14090	12945	12376	12210	12070	15335	12468	11534	11379	11282
$A_{\text{вп}}$, кВт·год	875	1008	1144	1210	1255	1613	2017	2301	2421	2460
a , кВт·год/ 10^4	149,9	139,8	135,4	134,4	133,5	169,8	145,1	138,6	138,2	137,7
a_T , кВт·год/ 10^4	141,1	129,7	124,0	122,3	120,9	153,6	124,9	115,5	114,0	113,0
$a_{\text{вп}}$, кВт·год/ 10^4	8,77	10,11	11,46	12,13	12,58	16,17	20,21	23,06	24,26	24,66
$a'_{\text{вп}}$, %	5,85	7,23	8,46	9,02	9,42	9,52	13,92	16,63	17,54	17,90
a'_T , %	94,15	92,77	91,54	90,98	90,58	90,48	86,08	83,37	82,46	82,09
Δa , %	2,65	2,88	3,59	6,15	7,81	—	—	—	—	—

Для більш точного порівняння двох способів ведення поїзда за даними тягових розрахунків було встановлено аналітичні залежності питомих витрат від швидкості руху поїзда:

$$a^{1 \text{ секція}}(V_T) = 0,0233 \cdot V_T^2 - 1,487 \cdot V_T + 155,73;$$

$$a^{2 \text{ секції}}(V_T) = 0,0388 \cdot V_T^2 - 2,726 \cdot V_T + 184,13.$$

Залежності зменшення витрат електроенергії від технічної швидкості представлені на рис. 11.

Приведена на рис. 11 крива показує, що на напрямку «Одеса-Сортувальна – Знам'янка-Сортувальна» можна зменшити витрати електроенергії при веденні поїзда однією секцією електровоза. Причому зі зменшенням часу руху поїзда (збільшенням технічної швидкості) відсоток економії електроенергії збільшується, а саме при технічній швидкості 40 км/год буде економія електроенергії 2,65 %, а при технічній швидкості 60 км/год - 7,81 %. В середньому при використанні тільки однієї секції електровоза можна буде отримати економію спожитої електроенергії до 5 %. Пояснення такого зменшення витрат електроенергії полягає в значному зменшенні витрат на власні потреби [7].

Висновки

1. Абсолютні та питомі витрати електроенергії на тягу поїздів та на власні потреби залежать від загального часу руху між станціями відправлення та прибуття, зі збільшенням загального часу руху абсолютні та питомі витрати електроенергії на тягу зменшуються, а абсолютні та питомі витрати електроенергії на власні потреби збільшуються.

2. Питомі витрати електроенергії на тягу поїздів на напрямку «Знам'янка-Сортувальна – Одеса-Сортувальна» при зміні часу руху від 6,5 до 10 годин зменшуються приблизно на 20 %. Витрати елек-

троенергії на власні потреби при цьому можуть збільшуватися приблизно на 40 %.

3. Доля витрат електроенергії на власні потреби в загальній сумі витрат електроенергії залежить від технічної швидкості, з ростом технічної швидкості доля витрат електроенергії на власні потреби суттєво зменшується.

4. При веденні поїзда масою, значно меншою розрахункової, зменшення витрат електроенергії на тягу на 5 % може бути досягнуте за рахунок відключення частини тягових двигунів (або однієї секції) електровоза. Таке відключення дозволяє підвищити показники енергетичної ефективності тягових перетворювачів та тягових двигунів.

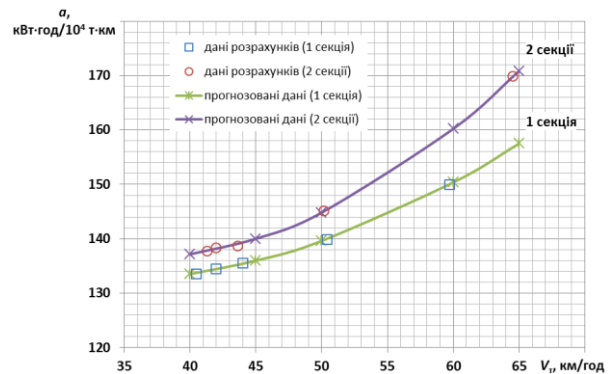


Рис. 10. Залежності питомих витрат електроенергії від технічної швидкості на напрямку «Одеса-Сортувальна – Знам'янка-Сортувальна»

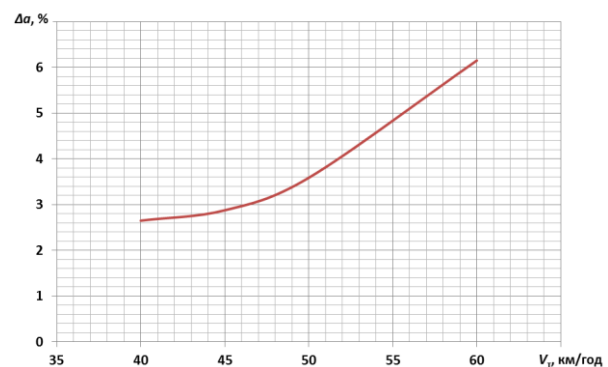


Рис. 11. Залежність зменшення витрат електроенергії від технічної швидкості на напрямку «Одеса-Сортувальна – Знам'янка-Сортувальна»

Бібліографічний список

1. Большаков, А. Н. Резервы энергосбережения / А. Н. Большаков, В. К. Верхотуров, А. Г. Коростелёв // Железнодорожный транспорт. – 2001. № 2. – С. 22–25.
2. Інструкція по технічному нормуванню витрат дизельного палива і електричної енергії на тягу поїздів (№ЦТ-0059) – Київ, Укрзалізниця, 2003. – 85 с.
3. Lustig, D. Повышение энергоэффективности локомотивов: локомотивостроение / D. Lustig // Железные дороги мира: научно-технический журнал. – 2010. – № 10. – С. 40–45.
4. Правила тяговых расчётов для поездной работы / Отв. за вып. А. Н. Долганов. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
5. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983 – 328 с.
6. Чёрный, В. С. О нормах непроизводительного расхода энергоресурсов на тягу поездов / В. С. Чёрный // Локомотив. – 2004. № 11. – С. 41.
7. Авилов, В. Д. Отключение части тяговых двигателей при управлении поездом / В. Д. Авилов, А. В. Климович // Железнодорожный транспорт. – 2008, № 2. – С. 60–62.

Ключові слова: ефективність електричної тяги, електровоз, секція електровоза, тягова характеристика, витрати електроенергії, питомі витрати електроенергії на тягу поїздів, витрати електроенергії на власні потреби.

Ключевые слова: эффективность электрической тяги, электровоз, секция электровоза, тяговая характеристика, расход электроэнергии, удельный расход электроэнергии на тягу поездов, расход электроэнергии на собственные нужды.

Keywords: efficiency of electric traction, electric locomotive, section of electric locomotive, hauling description, expense of electric power, specific expense of electric power on traction of trains, expense of electric power on own needs.

Рецензенти:

д.т.н., проф. А. М. Муха,
д.т.н., проф. О. М. Сінчук.

Надійшла до редколегії 13.10.2017.
Прийнята до друку 27.10.2017.