

ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОЇ ШВИДКОСТІ РУХУ ПОЇЗДІВ З ПРИМУСОВИМ НАХИЛОМ КУЗОВІВ ВАГОНІВ У КРИВИХ ДІЛЯНКАХ КОЛІЇ

Розглянута доцільність застосування рухомого складу з примусовим нахилом кузова вагонів на ділянці Київ–Дніпропетровськ. Показано, що використання такого рухомого складу не може бути ефективним без перебудови плану лінії й додаткових інвестицій в інфраструктуру залізниць.

Рассмотрена целесообразность применения подвижного состава с принудительным наклоном кузова вагонов на участке Киев–Днепропетровск. Показано, что использование такого подвижного состава не может быть эффективным без переустройства плана линии и дополнительных инвестиций в инфраструктуру железных дорог.

Expediency of application of rolling stocks with tilting cars on the rail section Kiev–Dnipropetrovsk has been considered. It has been shown that the use of such cars cannot be efficient without a reorganization of the track plane and additional investments into the railway infrastructure.

Пріоритетними напрямками модернізації залізниць України на наступні роки є відновлення колійного господарства і рухомого складу. Другий напрямок передбачає не тільки закупівлю, але й виробництво в Україні рухомого складу з примусовим нахилом кузовів вагонів. Перевага таких поїздів полягає в тому, що за рахунок конструктивної особливості вони здатні з більш високими швидкостями, ніж звичайний рухомий склад, проходити криві ділянки. Такий спосіб застосований, наприклад, на електропоїздах Pendolino (Італія), поїздах серії ІСТ (Німеччина) [1].

Як показали розрахунки, виконані для залізниць України, визначальними факторами, що впливають на кінцевий результат, є фактичні радіуси кривих, величини розрахункового підвищення зовнішньої рейки, яка визначається в основному вантажними поїздами, і крутизна відводу підвищення. Короткі перехідні криві і круті відводи підвищення зовнішньої рейки, наявність складових (два і більше радіусів) і сполучених кривих (розподілених короткими прямими вставками) не дозволяють забезпечити високі швидкості руху без перебудови кривих. Отже, характеристики плану лінії впливають на остаточний результат.

Наведемо дані з роботи [2] щодо можливості збільшення швидкості ΔV на напрямку Берлін–Мюнхен. Так, на ділянках Ерланген–Ліхтенфельс $\Delta V = 0$, Ліхтенфельс–Хохштадт–Марктцойльн $\Delta V = 10$ км/год, Хохштадт–Марктцойльн–Заальфельд – $\Delta V = 40$ км/год. З цього прикладу видно, що висновки щодо збільшення швидкості руху поїздів типу Pendolino і скорочення часу руху можна робити тільки після детальних досліджень конкретних ділянок.

Для проведення дослідження вибраний напрямок Київ–Дніпропетровськ, на якому в 2003 році був впроваджений прискорений рух денних експресів. Щоб урахувати частоту розташування кривих, їхні параметри і взаємний вплив на допустиму швидкість руху поїздів, цей напрямок був розподілений на окремі ділянки. Результати аналізу параметрів плану наведено на рис. 1 і в табл. 1.

З рис. 1 і табл. 1 випливає, що за параметрами плану ділянка Київ–Миронівка є найбільш придатною для організації швидкісного руху. Сумарна протяжність кривих становить 17,5 % від довжини ділянки, середній радіус 1 280 м. Інші ділянки є досить складними. Наприклад, на ділянці Миронівка–Т. Шевченка сумарна протяжність кривих 48,2 %, у т. ч. радіусом до 1 600 м – 42,1 %.

Дослідимо, по-перше, які допустимі швидкості руху в кривих може реалізувати рухомий склад з примусовим нахилом кузовів вагонів, по-друге, як складність плану лінії впливає на переваги рухомого складу з примусовим нахилом кузовів вагонів у порівнянні із звичайним рухомим складом, тобто на яких ділянках має місце найбільше зростання швидкості й економія в часі руху.

Методика дослідження базується на застосуванні тягово-експлуатаційної моделі, розробленої на кафедрі проектування і будівництва доріг ДПТУ. Така модель дозволяє встановлювати підвищення зовнішньої рейки в кривих і відповідну довжину перехідних кривих, визначити допустиму швидкість руху, виконувати тягові розрахунки, а також оцінювати комфортабельність їзди [3].

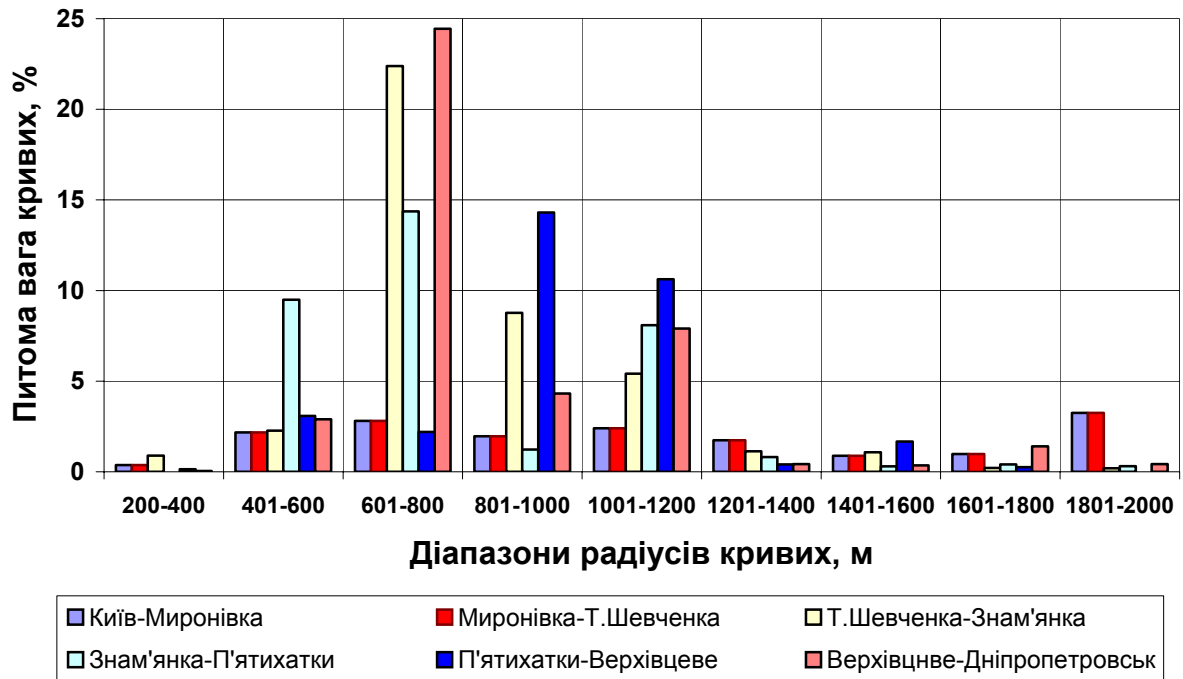


Рис. 1. Гістограма розподілу радіусів кривих на напрямку Київ–Дніпропетровськ

Таблиця 1

Характеристики плану ділянок, що досліджуються

Ділянки	Сумарна довжина кривих, $\sum K$		Сума кутів повороту, $\sum \alpha$	Середній радіус, $R_{сер}$	Питома вага кривих, $\gamma < 1600$ м
	км	%	град./км	м	%
Київ–Миронівка	18,9	17,5	7,86	1280	12,3
Миронівка–Т. Шевченка	52,3	48,2	22,98	1202	42,1
Т. Шевченка–Знам'янка	41,0	44,7	27,63	926	41,9
Знам'янка–П'ятихатки	36,9	35,9	22,23	924	34,3
П'ятихатки–Верхівцеве	17,8	36,3	18,65	1118	32,4
Верхівцеве–Дніпропетровськ	33,0	46,3	28,12	946	40,4

Поставимо питання, коли виникає необхідність застосування рухомого складу з примусовим нахилом кузовів вагонів. Щоб відповісти на нього, нагадаємо, що на залізницях мають місце суміщені вантажні й пасажирські перевезення, і по кривих рухаються поїзди з різними швидкостями. У кожній кривій розрахунком визначаються і встановлюються відповідні підвищення зовнішньої рейки h_{ϕ} . Для швидких поїздів підвищення h_{ϕ} може бути недостатнім. У цьому випадку центробіжна сила не зрівноважується і нестача підвищення визначається як

$$h_n = h_t - h_{\phi},$$

де h_t – теоретичне підвищення, що розраховано для самого швидкого поїзда.

На ділянках, де планується впровадження швидкісного руху поїздів, теоретичне підвищення h_t буде збільшуватись і різниця $h_t - h_{\phi}$, тобто нестача підвищення h_n також буде зростати і при деякому значенні швидкості поперечні сили можуть стати більше допустимих значень і тоді виникає необхідність обмеження швидкості руху, або застосування спеціального рухомого складу з примусовим нахилом кузовів вагонів [4].

Під час проходження кривих ділянок поїздами типу Pendolino кут нахилу кузова вагона регулюється $0...8^{\circ}$ залежно від кривизни колії за допомогою електронної системи, сенсорного блоку і пневмо- або гідроциліндрів. При цьому відцентрове прискорення, що діє на пасажирів, можна визначити за формулою

$$\alpha_{\text{нп}} = \frac{V^2}{3,6^2 R} - g \left(\frac{h}{S} + \varphi \right) \leq [\alpha_{\text{нп}}], \quad (1)$$

де V – швидкість руху поїзда в кривій, км/год;
 R – існуючий радіус кривої, м; S – відстань між осями головок рейок, $S=1600$ мм; g – прискорення вільного падіння, $g=9,81$ м/с²;
 h – підвищення зовнішньої рейки в кривій, мм;
 φ – кут нахилу кузова, рад; $[\alpha_{\text{нп}}]$ – допустиме значення непогашеного прискорення, м/с².

Формулу (1) можна привести до виду, зручного для проведення розрахунків за існуючими методиками [5]:

$$\frac{V^2}{3,6^2 R} - \frac{gh}{S} \leq [\alpha_{\text{нп}}]_{\text{умов}}, \quad (2)$$

де $[\alpha_{\text{нп}}]_{\text{умов}}$ – умовно допустиме непогашене прискорення за рахунок нахилу кузова

$$[\alpha_{\text{нп}}]_{\text{умов}} = [\alpha_{\text{нп}}] + g\varphi. \quad (3)$$

Аналогічно можна записати формулу для визначення зміни непогашеного прискорення, яке діє на пасажирів, в часі, тобто

$$\psi = \frac{V^3}{3,6^3 RL} - \frac{gV}{3,6L} \left(\frac{h}{S} + \varphi \right). \quad (4)$$

Подамо формулу (4) у вигляді

$$\psi + \frac{gV}{3,6L} \varphi = \frac{V^3}{3,6^3 RL} - \frac{gVh}{3,6LS}. \quad (5)$$

Права частина формули (5) є $[\psi]$, тоді формулу можна записати як

$$[\psi]_{\text{умов}} = [\psi] + \frac{gV}{3,6L} \varphi. \quad (6)$$

З формули (3)

$$g\varphi = [\alpha_{\text{нп}}]_{\text{умов}} - [\alpha_{\text{нп}}], \quad (7)$$

тоді

$$[\psi]_{\text{умов}} = [\psi] + \frac{[\psi] ([\alpha_{\text{нп}}]_{\text{умов}} - [\alpha_{\text{нп}}])}{[\alpha_{\text{нп}}]}$$

або

$$[\psi]_{\text{умов}} = \frac{[\psi][\alpha_{\text{нп}}] + [\psi][\alpha_{\text{нп}}]_{\text{умов}} - [\psi][\alpha_{\text{нп}}]}{[\alpha_{\text{нп}}]},$$

звідки

$$[\psi]_{\text{умов}} = \frac{[\psi][\alpha_{\text{нп}}]_{\text{умов}}}{[\alpha_{\text{нп}}]}. \quad (8)$$

Використовуючи наведені вище формули, були розраховані допустимі значення критеріїв для звичайного рухомого складу і умовно допустимі для рухомого складу з примусовим нахилом кузовів вагонів (табл. 2).

Таблиця 2

Прийняті критерії для виконання техніко-економічних розрахунків

Критерії	Позначення	Значення критеріїв для рухомого складу		
		без примусового нахилу кузова вагона	з примусовим нахилом кузова вагона	
Непогашені прискорення, м/с ²	у поодиноких кривих	$\alpha_{\text{нп}}$	0,7	1,8
	у суміжних кривих	$\alpha_{\text{нп}}^{\text{сп}}$	0,4	1,0
Зміна непогашеного прискорення, м/с ³	у поодиноких кривих	ψ	0,6	1,5
	у суміжних кривих	$\psi^{\text{сп}}$	0,3	0,7
Уклон відводу підвищення зовнішньої рейки, %	у поодиноких кривих	i	$i = 290V^{-1,153}$	
	у суміжних кривих	$i^{\text{сп}}$	$i = 84V^{-1,402}$	

Якщо зважити на те, що відцентрове прискорення, що діє на пасажирів в кривій, не перевищує встановлених значень $[\alpha_{\text{нп}}]$ і $[\psi]$, то допустимі швидкості руху можна розраховувати за формулами, що наведені в [5], використовуючи умовне значення підвищення зовнішньої рейки

$$h_{\text{умов}} = h_p + \Delta h,$$

де $\Delta h = S\varphi$ – додаткова компенсація непогашеного прискорення.

Але такий підхід враховує нормування тільки тих показників, що діють на пасажирів і обумовлюють комфортабельність їзди. Прискорення, що виникають в невідресореній частині екіпажу не будуть зменшені нахилом кузова. Тому питання взаємодії такого рухомого складу і колії потребує додаткового вивчення.

Тягові розрахунки виконані для вітчизняного рухомого складу з локомотивом ДСЗ і закордонного, з примусовим нахилом кузовів вагонів – Pendolino.

Результати, що показують можливість реалізації швидкостей руху Pendolino у порівнянні з ДСЗ в діапазоні 121...160 км/год наведені на рис. 2.

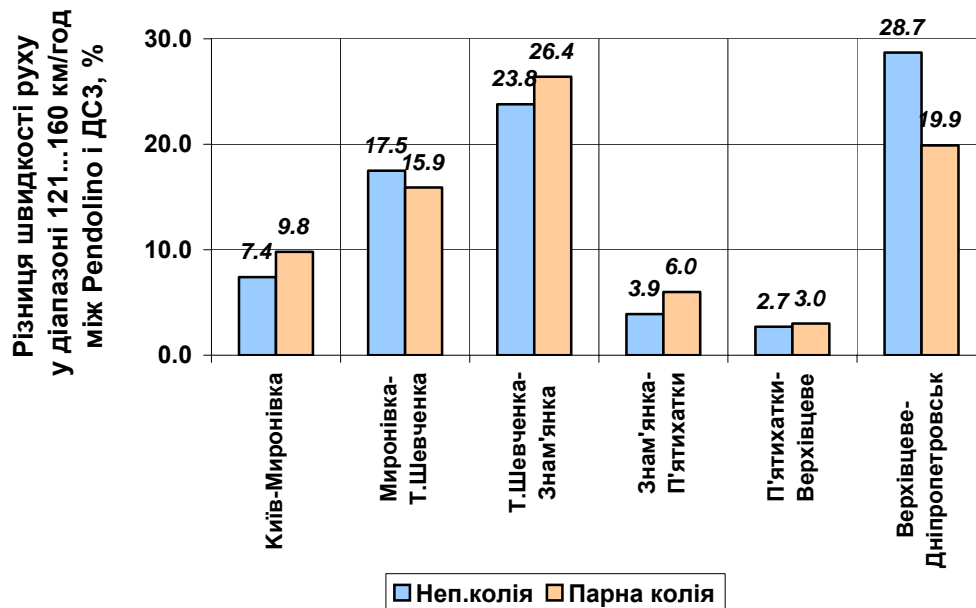


Рис. 2. Використання швидкостей руху 121...160 км/год при впровадженні Pendolino на напрямку Київ–Дніпропетровськ

З рис. 2 видно, що ефективність застосування рухомого складу з примусовим нахилом кузовів вагонів на різних ділянках неоднорідна, тому що кількість бар'єрних місць, де обмежу-

ється швидкість руху, теж різна. Бар'єрними місцями можуть бути поодинокі, складові і сполучені криві. Кількість таких ділянок колії наведена в табл. 3.

Таблиця 3

Кількість ділянок колії (поодинокі, складові, суміжні криві), що обмежують швидкість руху поїздів

Назва ділянки	Кількість кривих ділянок колії, що обмежують швидкість руху за показниками				
	R, h	$i_{\text{відв}}$	$C_{\text{прив}}, C_{\text{мін}}$	$R_{\text{прив}}, R_{\text{мін}}$	$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}$
Київ–Миронівка	28	8	3	0	5
Миронівка–Т. Шевченка	54	27	34	0	0
Т. Шевченка–Знам'янка	64	23	0	5	9
Знам'янка–П'ятихатки	25	18	20	2	3
П'ятихатки–Верхівцеве	23	6	2	0	0
Верхівцеве–Дніпропетровськ	48	13	11	2	1
Всього:	242	95	70	9	18
%	55,8	21,9	16,1	2,1	4,1

Примітка: R – радіус кривої, м; h – підвищення зовнішньої рейки, мм; i – уклон відводу підвищення зовнішньої рейки; $R_{\text{пр}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ – зведений радіус сполучення, м; $C_{\text{мін}} = R_{\text{мін}} \cdot L$ – параметр перехідної кривої, м²; $C_{\text{пр}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ – зведений параметр сполучення перехідних кривих, м².

З табл. 3 випливає, що найбільш вагомими обмеженнями швидкості (55,8 %) є поодинокі криві з недостатнім радіусом чи підвищенням

зовнішньої рейки. На другому місці (21,9 %) криві ділянки колії з крутим відводом підвищення через недостатню довжину перехідних кривих.

На ділянках складного плану швидкість обмежується зведеним параметром сполучення перехідних кривих (16,1 %).

Для прикладу розглянемо складові криві на ділянці Київ–Миронівка (км 57–58) з радіусами 794, 847, 725 і 877 м, існуючим підвищенням 70 мм і перехідними кривими відповідно 70 і 60 м (рис. 3).

З використанням тягово-експлуатаційної моделі встановлено, що мінімальна допустима швидкість для ДСЗ становить 105 км/год (табл. 4) і визначається за формулою

$$V = 3,6 \sqrt{R \left([\alpha_{\text{нп}}] + \frac{g}{S} h_p \right)}. \quad (9)$$

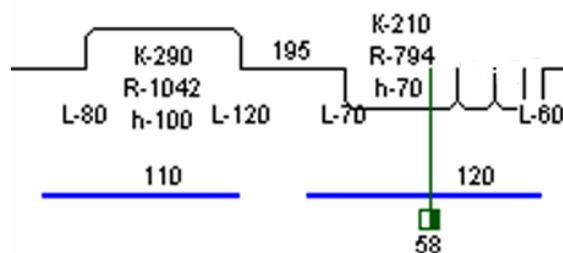


Рис. 3. Сполучені криві, що досліджуються

Таблиця 4

Допустима швидкість руху в кривих (км 57–58)

Тип елемента	Початок елемента	Довжина, м	Радіус, м	Підвищення, мм	Швидкість, км/год	Обмеження швидкості
Пряма	57 + 645	195	—	—	—	—
Перехідна	70	—	—	—	105	За формулою (9) $R = 725$ м, $h = 70$ мм, $\alpha_{\text{нп}} = 0,7$ м/с ²
Кругова	57 + 840	210	794	70		
Кругова	58 + 050	70	847	70		
Кругова	58 + 120	55	725	70		
Кругова	58 + 175	35	877	70		
Перехідна	60	—	—	—	—	—
Пряма	58 + 210	2 847	—	—	—	—

Допустима швидкість руху для Pendolino – 120 км/год, бо обмежується крутизною відводу підвищення зовнішньої рейки 1,2 ‰. Оскільки крутизна відводу визначається за формулою

$$i = \frac{h_p}{l},$$

то для підвищення швидкості можуть розглядатись варіанти збільшення підвищення зовнішньої рейки h_p (див. формулу 9) і відповідного подовження перехідної кривої l . У цьому ви-

падку зміщення осі колії по бісектрисі можна визначити за формулою

$$S_{\text{пер}} = \frac{1}{24R} (2l_{\text{суц}} + \Delta l) \Delta l, \quad (10)$$

де $\Delta l = l_{\text{пр}} - l_{\text{існ}}$; $l_{\text{пр}}; l_{\text{існ}}$ – довжини проекційної й існуючої перехідних кривих.

При $l_{\text{існ}} = 60$ м і $l_{\text{пр}} = 120$ м, $S_{\text{пер}} = 0,6$ м, що потребує уширення існуючого земляного полотна. Не виконуючи подовження перехідних кривих, а тільки збільшуючи підвищення зовнішньої рейки, маємо зворотний ефект (табл. 6).

Таблиця 6

Допустимі швидкості руху при збільшенні підвищення зовнішньої рейки і подовженні перехідних кривих

Підвищення, мм	Допустима швидкість, км/год							
	ДСЗ				Pendolino			
	Мінімальна довжина перехідних кривих, м				Мінімальна довжина перехідних кривих, м			
	60	80	100	120	60	80	100	120
70	105	105	105	105	120	145	145	145
80	105	105	105	105	105	135	145	145
90	95	110	110	110	95	120	145	145
100	85	110	110	110	85	110	135	145
110	75	100	115	115	75	100	125	145
120	70	95	115	115	70	95	115	145

Висновки

1. Організація швидкісного руху поїздів на напрямках із суміщеним вантажним і пасажирським рухом значно ускладнює утримання колії, особливо тих ділянок, що розташовані в кривих.

2. Застосування рухомого складу з примусовим нахилом кузовів вагонів і відповідної системи руху не можна розглядати без модернізації існуючих ділянок і додаткових інвестицій в інфраструктуру залізниць. Впровадження нового рухомого складу слід розглядати як додаток до загального комплексу заходів з підвищення швидкості руху поїздів.

3. Висновки щодо збільшення швидкості руху поїздів під час впровадження рухомого складу з примусовим нахилом кузовів вагонів слід робити для кожного з напрямків залізниць окремо залежно від складності плану й профілю лінії, частоти розташування роздільних пунктів та інших факторів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Зубко А. П. Аналіз можливості застосування рухомого складу з примусовим нахилом кузова вагонів при організації швидкісного руху / А. П. Зубко, І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту за-

- лізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – Вип. 4. – С. 156–164.
2. SIX CARS ELECTRIC PENDOLINO for Ukraine. Technical Description. Alstom. Savigliano. – 2003. – 18 p.
3. Курган М. Б. Організація швидкісного руху при застосуванні рухомого складу з примусовим нахилом кузова вагонів / М. Б. Курган, І. П. Корженевич, В. В. Арсонов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, – 2006. – Вип. 11. – С. 41–47.
4. Харлан В. І. Дослідження впливу параметрів траси залізниці і типу рухомого складу на рівень максимальної швидкості // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 4. – Д.: Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – С. 74–83.
5. Орловський А. М. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих / А. М. Орловський, О. М. Патласов, В. В. Циганенко, Л. Я. Воробейчик, В. І. Климов, М. Б. Курган: ЦП/0056: Затв. наказом Укрзалізниці від 27.04.99 № 124-Ц. – Д.: Арт-Прес, 1999. – 44 с.

Надійшла до редколегії 07.06.2006.