

В. В. РИБКІН, М. Б. КУРГАН, Д. М. КУРГАН (ДПТ),
В. І. ХАРЛАН (Придніпровська залізниця)

РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПЕРЕБУДОВИ КРИВИХ В ПЛАНІ ПРИ ПІДВИЩЕННІ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ПОЇЗДІВ

Запропонований підхід перебудови кривих в плані базується на мінімізації дії вантажного рухомого складу на колію і комфортабельній їзді пасажирів при впровадженні швидкісного руху.

Предложен подход переустройства кривых в плане, который основывается на минимизации действия грузового подвижного состава на путь и комфортабельность езды пассажиров при введении скоростного движения.

The approach of a reorganization of curves in the plan which is based on minimization of action of a cargo rolling stock for a way and comfortableness of passengers driving at introduction of high-speed movements is offered.

Загальні положення. Постановка задачі

Сьогодні в Україні ведеться активна робота щодо організації швидкісного залізничного сполучення, поліпшується якість обслуговування пасажирів. Укрзалізниця має Програму впровадження прискореного руху пасажирських поїздів на 2002–2006 рр. – «Столичний експрес». Згідно Програми в липні 2002 р. був уведений в експлуатацію денний швидкісний пасажирський експрес сполученням Харків–Київ, а з 1 серпня почав курсувати швидкісний поїзд сполученням Дніпропетровськ–Київ.

Досягти установленної маршрутної швидкості 100 км/год тільки за рахунок організаційно-технологічних заходів (перерозподіл поїздопотоків на мережі, вдосконалення графіка руху

поїздів, раціонального використання наявних технічних засобів) неможливо. Необхідно було впровадити й більш дорогі заходи – модернізацію залізниці, що включала заміну верхньої будови колії, штучних споруд та інших пристроїв залізниці, а також провести реконструктивні роботи пов'язані, перш за все, з перебудовою кривих.

Щоб визначитись з необхідними заходами щодо модернізації й реконструкції тих чи інших ділянок залізниці був проведений аналіз технічного стану, параметрів поздовжнього профілю й плану залізниці. У якості прикладу на рис. 1 і 2 наведена загальна характеристика профілю й плану лінії Київ–Дніпропетровськ.

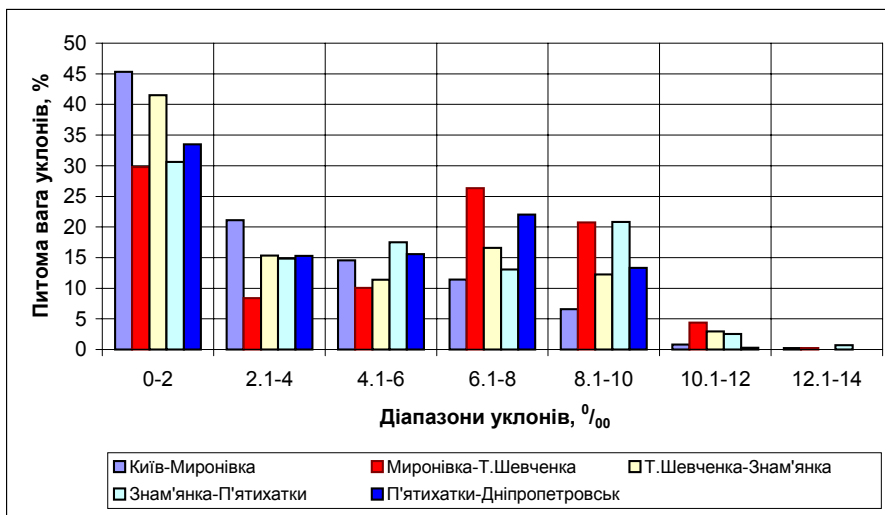


Рис. 1. Гістограма розподілу уклонів

Як видно з рис. 1, найбільш складними за профільними умовами є ділянки Миронівка–Т. Шевченко і Знам'янка–П'ятихатки–Дніпропетровськ, де питома вага уклонів більших за 4 % становить 50 % і більше. Зменшуючи масу

поїзда, навіть при існуючих електровозах, можна вирішити задачу підвищення максимальної швидкості. Більш серйозною сьогодні є задача підвищення швидкості руху в кривих.

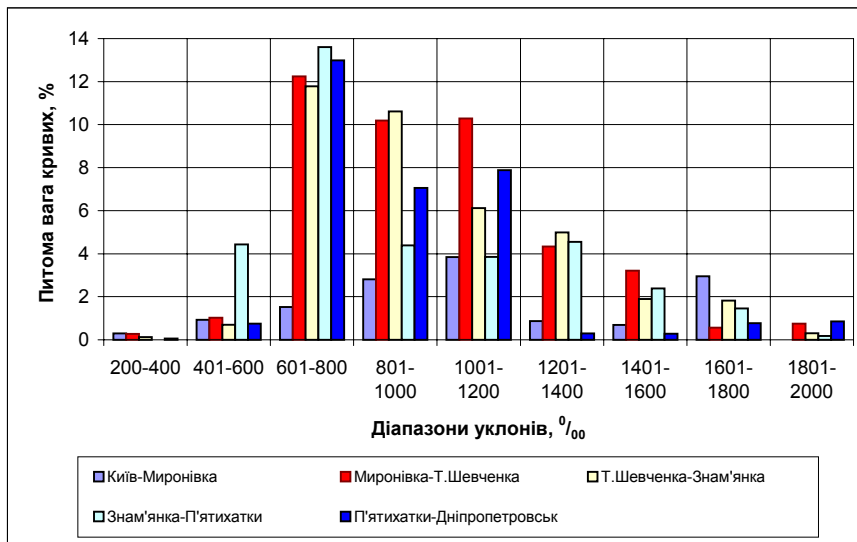


Рис. 2. Гістограма розподілу кривих

З рис. 2. видно, що найскладнішими з точки зору плану лінії (протяжність кривих з радіусами менше 1500 м) є ділянки Миронівка – Т. Шевченка (42 %) і Т.Шевченка – Знам'янка (36 %). Не набагато кращий план на інших ділянках, за виключенням першої. На етапі впровадження максимальної швидкості 140 км/год (прискорений рух) на всьому напрямку було заплановано уположити більше 20-ти кривих, в тому числі 8 – на ділянці Придніпровської залізниці Дніпропетровськ–П'ятихатки.

Ліквідація таких бар'єрних місць як криві, поставила перед практиками і науковцями задачу обґрунтування параметрів плану лінії (мінімального радіуса, підвищення зовнішньої рейки, довжини перехідних кривих і прямих вставок між суміжними кривими) в залежності від структури поїздопотуку, рівня максимальної швидкості та ін. факторів.

Існуюча методика визначення мінімального радіусу

У нормативному документі, що діє до теперішнього часу в Україні [1] у п. 2.13 сказано «Величину найменшого радіуса кривих при усилених (реконструкції) існуючих залізничних дорог слід установлювати в залежності від намічаємих швидкостей руху пасажирських і вантажних поїздів і величини радіусів існуючого шляху». Фактично на цьому вичерпуються рекомендації, що стосуються реконструкції існуючих залізниць. Не дають відповіді на це питання і будівельно-технічні норми Російської Федерації [2].

Методика визначення мінімальних радіусів кривих за умов забезпечення міцності і стійкості

ті колії і рухомого складу, безпеки руху й комфорту пасажирів викладена в роботі проф. Єршкова О. П. [3]. Дотримання цих умов описується трьома розрахунковими формулами:

– забезпечення однакової вертикальної силової дії на обидві рейкові нитки від сумарного потоку поїздів

$$\sum Q_i^{30B} = \sum Q_i^{BH}; \quad (1)$$

– неперевикнення непогашених прискорень, спрямованих від центру кривої при проходженні найбільш швидкого поїзда

$$\alpha_{\text{нп пас}} \leq [\alpha_{\text{нп}}]_{30B}; \quad (2)$$

– обмеження непогашених прискорень, спрямованих усередину кривої при проходженні вантажного поїзда з найменшою швидкістю

$$\alpha_{\text{нп вантаж}} \leq [\alpha_{\text{нп}}]_{\text{BH}}. \quad (3)$$

Зі спільного вирішення умов (1) і (2), одержуємо формулу для визначення R_{min}

$$R_{\text{min рек}} = \frac{V_{\text{max пс}}^2 - kV_{\text{серз}}^2}{3,6^2 [\alpha_{\text{нп}}]_{30B}}, \quad (4)$$

де $V_{\text{серз}}$ – середньозважена швидкість поїздопотуку [4]; k – коефіцієнт, що враховує зміщення центру ваги екіпажу в зовнішню сторону по відношенню до осі кривої.

Формула (4) не враховує динаміку перевезень. При збільшенні на швидкісних залізницях питомої ваги пасажирського руху зростає середньозважена швидкість $V_{\text{серз}}$, а величина R_{min} зменшується. Недоліком вище викладеного

підходу є й те, що швидкості поїздів різних категорій у місці розташування кривої задаються детермінованими [5].

Доповнення до існуючої методики визначення мінімального радіуса

Як показав аналіз, фактичні швидкості руху поїздів є випадковими величинами [4]. Щоб дослідити вплив усього спектра швидкостей від мінімальних до максимальних на величину підвищення зовнішньої рейки, за даними швидкостемірних стрічок вантажних і пасажирських поїздів були побудовані графіки розподілу швидкостей [6]. На рис. 3 показаний фрагмент такого розподілу.

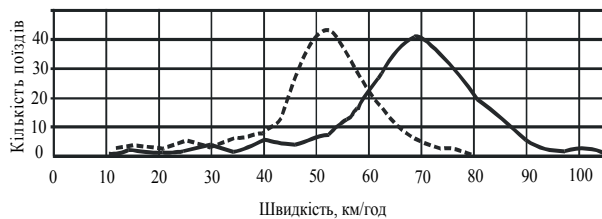


Рис. 3. Розподіл швидкостей руху (сувільна лінія відповідає пасажирському, а пунктирна – вантажному руху)

Аналіз статистичних даних показав, що розподіл швидкостей руху поїздів у одному перетині колії для всіх поїздів даного типу (однакові вантажі) наближається до нормального закону. Оцінка відхилень емпіричного розподілу від нормального за критеріями згоди показала, що в більшості вибірок ці відхилення не значимі, і в подальших розрахунках можна використовувати теоретичні криві розподілу швидкостей [6].

Для прогнозування розподілу швидкостей на ділянках залізниць, де передбачається введення швидкісного руху поїздів, можна використовувати теоретичні криві по типу таких, які представлені на рис. 3.

Максимальні значення швидкостей за таким розподілом (див. рис. 3) установлюються тяговими розрахунками, а середньоквадратичне відхилення приймається за результатами статистичної обробки швидкостемірних стрічок [4], тобто приблизно таким, як до реконструкції залізниці. Розрахунки показують, що в більшості випадків величина середньоквадратичного відхилення складає 10–17 км/год.

Таким чином, потік поїздів представляється у вигляді тривимірної поверхні, що є апроксимуючою для реального розподілу мас і швидкостей поїздів [7]. Така поверхня описується

рівнянням $N = f_F(V, Q)$, що визначає кількість поїздів для заданої швидкості й маси. Сумарний вплив потоку поїздів на колію визначається за формулою

$$F = \int_{Q_{\min}}^{Q_{\max}} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} Q \cdot f_{\alpha}(V, R, h) \cdot f_F(V, Q) dV dQ, \quad (5)$$

де $f_{\alpha}(V, R, h)$ – непогашене поперечне прискорення, що залежить від швидкості і параметрів кривої (радіуса й підвищення).

З метою наближення функції f_F до реальних умов експлуатації, потік поїздів розбивається на категорії, для кожної з яких задаються параметри законів розподілу. Наприклад, у роботі [7] вантажні поїзди представлені в наступних видах: повносоставні (під час перевезення легких вантажів маса рухомого складу обмежується корисною довжиною приймально-відправних колій) і повновагомі поїзди (їхня маса обмежена потужністю локомотива при русі по керівному підйому). Крім того, враховуються приміські та поїзди інших категорій.

При визначенні оптимального підвищення в кривій вирішується наступна система рівнянь:

$$F(h) \rightarrow \min; \quad (6)$$

$$f_{\alpha}(V_{\max}, R, h) \leq [\alpha]_{\text{пр}}; \quad (7)$$

$$f_{\alpha}(V_{\max}, R, h) \geq [\alpha]_{\text{вн}}. \quad (8)$$

де $F(h) \rightarrow \min$ – мінімальна сумарна дія поперечних сил на колію в кривій. Останнє забезпечується в тому випадку, коли виконується умова

$$\sum n_i Q_i \alpha_{\text{пп}(i)} \rightarrow \min,$$

де $n_i, Q_i, \alpha_{\text{пп}(i)}$ – число, маса і непогашені прискорення, що реалізуються поїздом i_i категорії.

Знаючи план лінії, можна сформулювати вимоги до структури поїздопотіку і швидкостям руху всіх категорій поїздів.

Відповідно до формул (6–8) в ДПТі розроблена програма з використанням імовірного моделювання поїздопотіку. В результаті розрахунків визначаються мінімально рекомендуємий радіус $R_{\text{мі.грек}}$ (за умови 6) і мінімально допустимий радіус $R_{\text{мі.рдоп}}$ (за умов 7 і 8), а також встановлюється відповідне підвищення зовнішньої рейки.

Визначення підвищення зовнішньої рейки в кривій за умови оптимальної роботи колії

Підвищення зовнішньої рейки в кривих забезпечує приблизно однакове вертикальне навантаження рейкових ниток, дозволяючи при цьому зменшити величини направляючих, бічних і рамних сил і тим самим знизити вплив на колію і забезпечити умови комфортабельної їзди пасажирів. Щоб підтвердити цю тезу, при виконанні розрахунків була використана математична модель і програма обчислень, розроблені лабораторією динаміки і міцності рухомого складу ДПТА.

Так як на існуючих міжнародних транспортних коридорах має місце суміщений вантажний і пасажирський рух поїздів, то виконувалось моделювання просторових коливань як для вантажного, так і для пасажирського вагонів.

В якості приклада в табл. 1 приведені значення сумарних бічних сил, що виникають при русі вантажного вагона в кривій радіусом 700 м.

Таблиця 1

Сумарні бокові сили при русі вантажного вагона в кривій радіуса 700 м

Підвищення зовнішньої рейки, мм	Сумарні бокові сили, кН, при швидкості руху, км/год			
	40	60	80	100
30	160,23	130,81	155,21	203,96
60	144,20	117,65	140,71	186,22
90	124,54	107,82	127,98	170,98
120	114,25	108,44	114,65	156,21
150	109,56	110,56	110,15	142,30

За даними табл. 1 побудовані графіки залежності сумарних бокових сил від швидкості руху при різних значеннях підвищення зовнішньої рейки, рис. 4.

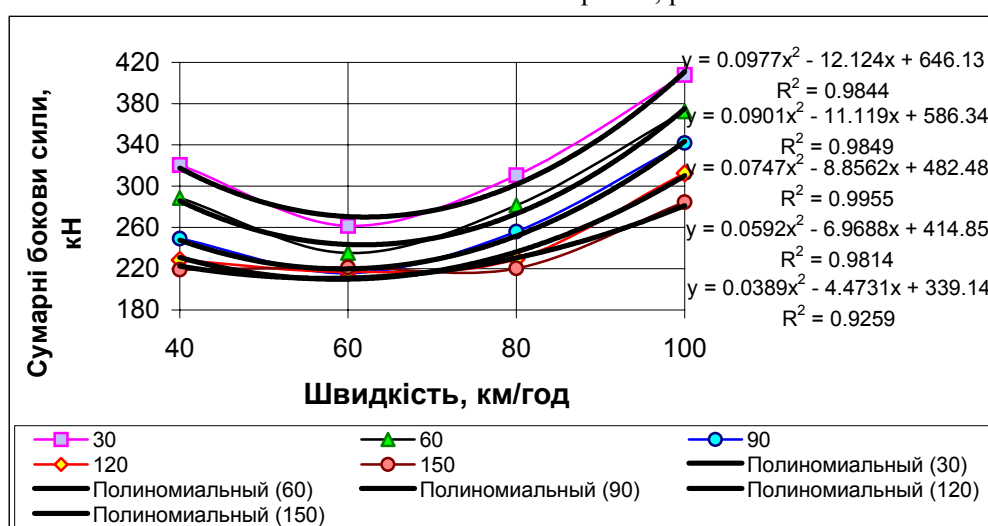


Рис. 4. Залежність сумарних бокових сил від швидкості руху

Аналіз графіків показав, що при певних рівнях швидкості і підвищенні зовнішньої рейки при русі екіпажа по кривій має місце мінімум дії на колію сумарних бокових сил. Середня бокова сила, що діє на відріжку колії може бути представлена у вигляді

$$HB_{\text{ср}}(h) = \int_L^{\bar{V}} HB(V, h) f(V) dV.$$

Залежність бокової сили від швидкості руху і підвищення зовнішньої рейки можна представити у вигляді полінома (див. рис. 4)

$$HB(V, h) = aV^2 + bV + c, \quad (9)$$

де

$$a = a_1h^2 + a_2h + a_3; \quad b = b_1h^2 + b_2h + b_3;$$

$$c = c_1h^2 + c_2h + c_3.$$

В результаті виконаної апроксимації отриманих при моделюванні даних, були встановлені залежності $HB(V, h)$ і побудовані графіки шуканих коефіцієнтів a, b, c , рис. 5–7.

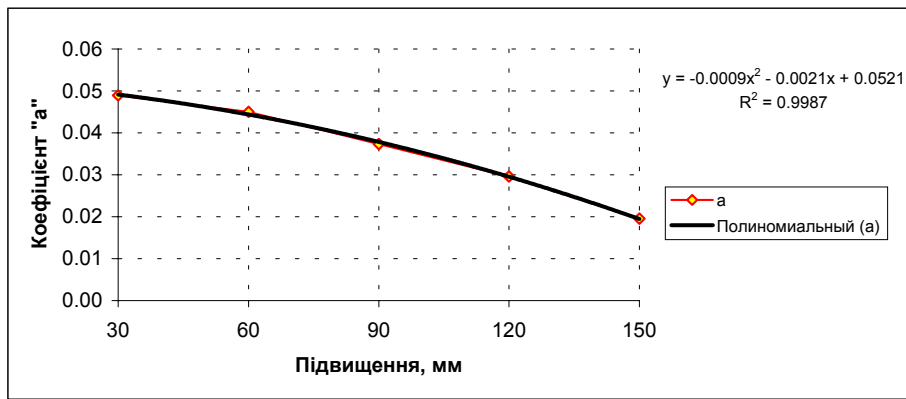


Рис. 5. Графік залежності коефіцієнта $a(h)$

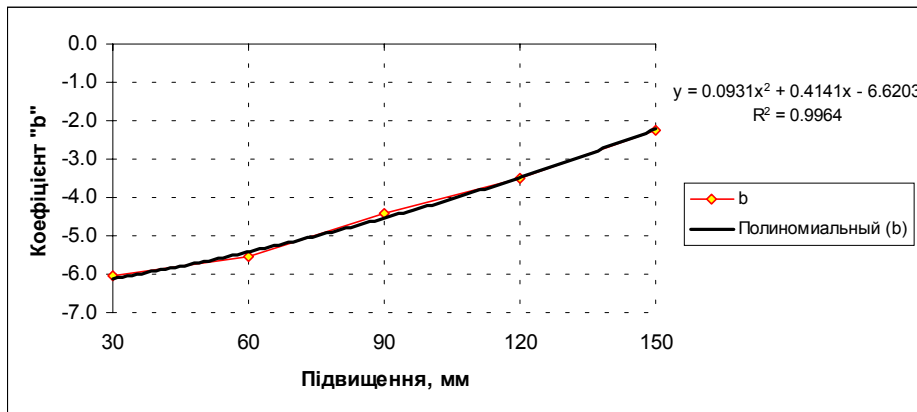


Рис. 6. Графік залежності коефіцієнта $b(h)$

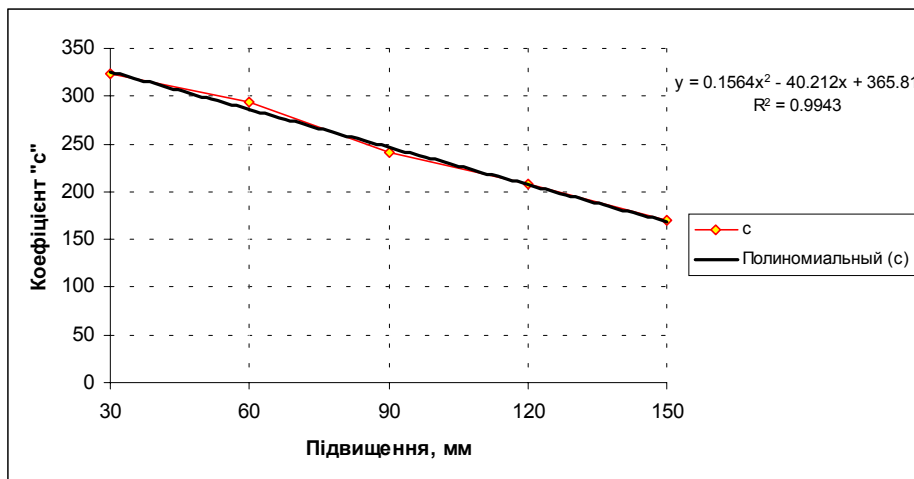


Рис. 7. Графік залежності коефіцієнта $c(h)$

Значення отриманих коефіцієнтів a, b, c для рівняння $HV = ah^2 + bh + c$ приведені в табл. 2

У результаті проведених розрахунків отримана аналітична залежність функції (9), використовуючи яку були встановлені значення бокових сил, табл. 3.

Аналіз даних табл. 3 показав, що отримані в результаті моделювання бокові сили можна представити у вигляді аналітичних залежностей з похибкою в основному до 5%, що знаходиться у межах точності розрахунків.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів a, b, c

Підвищення зовнішньої рейки, мм	Коефіцієнти рівняння $HV = ah^2 + bh + c$		
	a	b	c
30	0,048856	-6,06192	323,0635
60	0,045037	-5,55965	293,1680
90	0,037325	-4,42810	241,2420
120	0,029606	-3,48443	207,4235
150	0,019469	-2,23658	169,5715

Таблиця 3

Співставлення фактичних і розрахункових бокових сил

Підвищення зовнішньої рейки, мм	Швидкість, км/год	Бокові сили, кН		Відхилення, %
		фактичні	розрахункові	
30	40	160,23	158,76	1,48
	60	130,81	135,23	-4,42
	80	155,21	150,79	4,42
	100	203,96	205,43	-1,47
60	40	144,20	142,84	1,36
	60	117,65	121,72	-4,07
	80	140,71	136,64	4,07
	100	186,22	187,58	-1,36
90	40	124,54	123,84	0,70
	60	107,82	109,93	-2,11
	80	127,98	125,87	2,11
	100	170,98	171,68	-0,70
120	40	114,25	115,42	-1,17
	60	108,44	104,94	3,50
	80	114,65	118,15	-3,50
	100	156,21	155,04	1,17
150	40	109,56	111,26	-1,70
	60	110,56	105,46	5,09
	80	110,15	115,25	-5,09
	100	142,30	140,60	1,70

З використанням стандартної програми Maple 7 була виконана мінімізація функції (9) і встановлено, що мінімальний вплив на колію від сумарної дії всіх бокових сил (для розглянутого прикладу) матиме місце при швидкості руху вантажного поїзда в кривій радіусом 700 м близько 60 км/год з встановленим підвищенням зовнішньої рейки 130 мм.

У результаті моделювання і проведених розрахунків встановлено, що співвідношення швидкостей руху і діапазон їхньої зміни по кожній категорії поїздів має важливе значення для встановлення підвищення зовнішньої рейки і розрахунку довжини перехідної кривої, а також для визначення рівня динамічного впливу поїздів на колію. Раніше вважалося [3], що мінімум бічного впливу рухомого складу на колію в кривих буде при непогашених відцентрових прискореннях $\alpha_{\text{нп}} \rightarrow 0$. Таке ствердження справедливе тоді, коли екіпаж розглядається спрощено у вигляді матеріальної точки чи відрізка, що рухається по геометрично плавних кривих.

Моделювання процесу взаємодії рухомого складу і колії в кривих ділянках показав, що при врахуванні таких факторів як пружність ресорного підвішування, нерівностей на колії і колесах рухомого складу, віджатіє рейкових ниток під навантаженням, наявність зазорів між гребенями коліс і рейками, що приводить до здвигу центра тяжіння екіпажу відносно вісі колії, оптимум функції сумарних бічних сил має місце при менших значеннях швидкості руху, ніж за умовою $\alpha_{\text{нп}} = 0$, рис. 8. Дані зіставлення швидкостей руху приведені в табл. 4. Слід звернути увагу, що підвищення зовнішньої рейки, знайдене за умови оптимальної взаємодії рухомого складу й колії не є остаточним вирішенням проблеми.

Таблиця 4

Зіставлення швидкостей руху в кривій радіуса 700 м за умови мінімальних непогашених прискорень і бічного впливу на колію

Показники	Підвищення, мм				
	30	60	90	120	150
Швидкість, км/год при $\alpha_{\text{нп}} = 0$, (рис. 7)	45	60	72	83	93
Швидкість, км/год при сумарних бічних силах $\sum HV \text{ min}$, (рис. 3)	60	62	64	66	70
Зміна швидкості, %	25,0	3,2	-12,5	-25,8	-32,9

При призначенні більшого підвищення ніж розрахованого за умови (9) не забезпечується рівність силового впливу від потоку поїздів на рейкові нитки в кривих, що можна допустити з метою пропуску швидкісних поїздів. При цьому в кривих радіусів менших за 800...900 м може бути збільшена швидкість руху поїздів і зменшена вартість пробігу поїзда, рис. 9

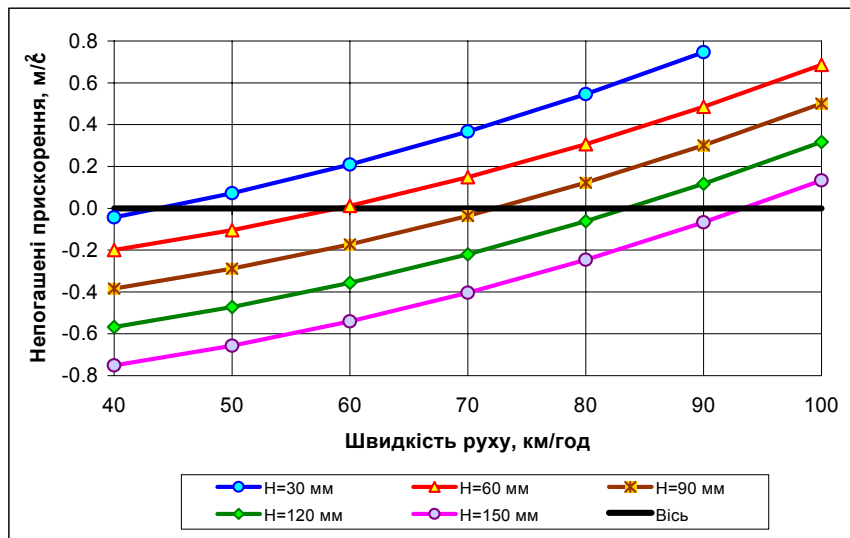


Рис. 8. Зміна непогашених поперечних прискорень в кривій радіуса 700 м в залежності від швидкості руху і підвищення зовнішньої рейки

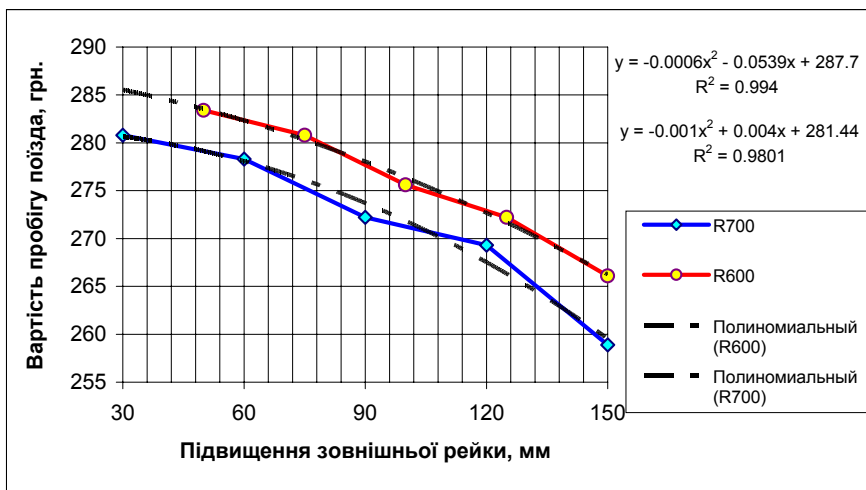


Рис. 9. Графіки вартості пробігу поїзда в залежності від встановленого підвищення зовнішньої рейки в кривих радіусом 600 і 700 м

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Строительные нормы и правила. Железные дороги колеи 1520 мм. СНиП II-39-76. М.: Стройиздат, 72 с.
2. Строительно-технические нормы Министерства путей сообщения Российской Федерации. Железные дороги колеи 1520 мм. СТН Ц-01-95. М., 1995. – 86 с.
3. Высокоскоростное движение (на железных дорогах) / Под ред. Н. В. Колодяжного. – М.: Транспорт, 1976. – 416 с.
4. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії. – Д.: Арт-Прес, 1999. – 44 с. (ЦП-0056)

5. Курган Н. Б., Курган Д. Н., Рыбачок П. И. Определение минимального радиуса кривых в плане для достижения проектных скоростей // Залізничний транспорт України. – 1999. № 2. – С. 2–4.
6. Орловский А. Н., Цыганенко В. В., Воробейчик Л. Я., Патласов А. М. Определение возвышения наружных рельсов в кривых по фактическим скоростям движения поездов // Залізничний транспорт України. – 1999, № 4. – С. 10–12.
7. Блохин Е. П., Кирпа Г. Н., Корженевич И. П., Курган Н. Б. Определение параметров плана линии при организации скоростного сообщения Западной Европа-Львов // Транспорт / Зб. наук. праць ДІПТУ. Вип. 6. Д.: Арт-Прес, 2000. – С. 21–28.