

Курган М. Б., Хмелевська Н. П., Байдак С. Ю. (ДНУЗТ)

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ КРИВИХ ДЛЯ ЗАДАНОГО РІВНЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ

Розглянуто проблеми перебудови плану залізничної колії з визначенням раціональних параметрів кривих при підготовці інфраструктури до впровадження прискореного руху. Викладено переваги і недоліки існуючих способів зйомки кривих в сучасних умовах, наведена класифікація та оцінка точності зйомки кривих, що використовуються при поточному утриманні в колійному господарстві та на стадії проектування реконструкції плану лінії. Наведено техніко-економічні показники оцінки проектних рішень і визначення раціональних проектних параметрів плану на прикладі ділянки Львів - Зборів.

Рассмотрены проблемы переустройства плана железнодорожного пути с определением рациональных параметров кривых при подготовке инфраструктуры к внедрению ускоренного движения. Изложены достоинства и недостатки существующих способов съёмки кривых в современных условиях, приведена классификация и оценка точности съёмки кривых, используемых при текущем содержании в путевом хозяйстве и на стадии проектирования реконструкции плана линии. Приведены технико-экономические показатели оценки проектных решений и определение рациональных проектных параметров плана на примере участка Львов - Зборов.

The problems of restructuring plan of railway were considered. The rational parameters of the curves in the preparation of the infrastructure for the introduction of accelerated motion were found. Set out the advantages and disadvantages of existing methods shooting curves in modern conditions, classification and measurement of precision shooting of curves was given which are used in road maintenance and design stage for reconstruction of plan lines. Are technical and economic parameters to evaluate the design decisions, definition of rational design parameters of the site plan for example Lvov - Zborov.

Ключові слова: план, зйомка кривих, раціональні параметри, тягові розрахунки.

Загальні положення

Велика кількість обмежень швидкості на залізницях України пов'язана з параметрами і станом плану залізничної колії. Щоб збільшити швидкість руху поїзда по кривій необхідно визначити раціональні параметри і поставити криву в правильне положення. Розрахунки показують, що при проектуванні ремонтів колії можна досягнути суттєвого виграшу в часі руху тільки за рахунок виконання вимог ЦП-113 (п.2.3.2-2.3.4 ...виправлення кривих в плані з відновленням проектних

радіусів) [1], тобто вкладати колію при капітальному ремонті в проектне положення.

Роботи з перебудови кривих виконувались на залізницях України при підготовці інфраструктури до впровадження прискореного руху поїздів на напрямках Київ-Полтава-Красноград-Лозова-Донецьк, Київ-Коростень-Здолбунів-Львів [2]. На стратегічному напрямку Полтава-Красноград-Лозова національного пасажирського транспортного коридору були виконані роботи по розширенню земляного полотна з метою збільшення радіусів десяти кривих, які за своїми параметрами стримували встановлену максимальну швидкість 160 км/год [3].

Умови призначення раціональних параметрів кривих

Раціональними є такі параметри кривих, при яких забезпечуються:

– оптимальна взаємодія рухомого складу і колії $F = \sum (N_i, Q_i, \alpha_i) = \min$;

– плавність і комфортабельність їзди $[\alpha_{i\bar{i}\min}] \leq \alpha_{i\bar{i}} \leq [\alpha_{i\bar{i}\max}]$;

$\psi \leq [\psi]$; $f_v \leq [f_v]$;

– мінімальні обсяги робіт і витрати на перебудову кривих, які окупаються за нормативний термін.

У вище наведених виразах $[\alpha_{i\bar{i}\max}]$, $[\alpha_{i\bar{i}\min}]$ - допустимі непогашені прискорення для вантажних поїздів $\pm 0,3 \text{ м/с}^2$, для пасажирських – $0,7 \text{ м/с}^2$ (з дозволу Укрзалізниці – до $1,0 \text{ м/с}^2$); ψ, f_v - відповідно швидкість зміни непогашеного прискорення в часі і швидкість підйому колеса по відводу підвищення зовнішньої рейки в кривій; F - сумарний силовий вплив на обидві рейкові нитки від потоку поїздів; N_i, Q_i - кількість і маса поїздів i категорії та середні непогашені прискорення α_i , які виникають під час руху по кривій.

Способи отримання інформації про стан плану колії

Питання виправки і перевлаштування плану залізничної колії давно хвилюють інженерів-коліїників. Ще в 60-х роках на сторінках журналу «Путь и путевое хозяйство» широко обговорювалося питання про те, який спосіб зйомки кривих кращий. Висловлювалися різні думки, часом протилежні, про такі способи, як «спосіб стріл» і спосіб Гонікберга. Які дані повинні бути покладені в основу розрахунку кривих – кути повороту чи стріли вигину? На підставі проведеного аналізу І. Я. Туровським зроблено висновок, що заміри фактичного положення колії в плані за допомогою капронової нитки точніші, ніж теодолітом, тому що теодоліт є кутомірним інструментом, а в способі Гонікберга його застосовують для виміру лінійних величин [4].

Однак, зазначимо, що обидва названі способи використовують детерміновану інформацію про стан кривих і значення кривизни кривої беруться тільки в точках виміру стріл вигину.

Проблема не була такою гострою, поки не з'явилася необхідність підвищення швидкостей руху та моніторингу технічного стану плану колії.

При визначенні проектних параметрів плану на ділянках прискореного й швидкісного руху поїздів передбачається, що виконана зйомка є точною. Зйомку кривих ведуть по одній з рейок, а визначені розрахунком параметри вважають такими, що належать осі колії. Прямі ділянки колії практично не знімаються і не рихтуються. При побудові математичної моделі існуючого плану використовується

неточна модель, при якій вважається, що три сусідні точки кривої лежать на колі. На такому принципі побудована робота ВПР – метод згладжування.

Абсолютна більшість сучасних методів розрахунків виправки кривих базується на визначенні зсувів у окремих точках колії через різницю довжин евольвент для існуючого й проектного варіантів (евольвентна модель). При довгих кривих, великих значеннях зсувів та значних коливаннях кривизни існуючої колії евольвентна модель може давати суттєві похибки. Більш точно зсуви можуть визначатися в системі координат шляхом геометричного представлення проектного варіанту та знаходження відстані від початкової точки до її проектного положення (координатна модель).

Оскільки збільшення швидкості ставить підвищені вимоги до якості проектування, виправки і утримання кривих, необхідні нові підходи до зйомки, розрахунків та виконання робіт. Безумовно, це призведе до підвищення вартості зйомки і проектування таких ділянок, однак це вимушений крок, без якого реалізувати якісне підвищення швидкостей буде практично неможливо. Те, що слабо впливало на показники руху поїздів при швидкостях 100-120 км/год, стає важливим при швидкостях 160 км/год і більше.

Щоб встановити, як впливає вихідна інформація про план лінії на визначення раціональних параметрів кривих і допустимі швидкості руху поїздів, було проведено аналіз способів зйомки (таблиці 1, 2).

Таблиця 1. Класифікація способів зйомки плану лінії, що застосовуються в колійному господарстві

Способи зйомки плану лінії в колійному господарстві		Пояснення
1	Метод стріл	Спосіб дозволяє достатньо точно оцінити кривизну двох сусідніх точок, але дає помилку при визначенні кута повороту, який розраховується через суму стріл. Випадкові помилки вимірів стріл розподіляються за нормальним законом з параметрами: математичне очікування різниці стріл $\Delta \bar{f} = 0$, середньоквадратичне відхилення $\sigma_{\Delta f} = 1,2$ мм.
2	Зйомка колієвимірними вагонами (КВЛ)	Асиметрія вимірної схеми, велика похибка виміру пройденого шляху не дозволяють отримати достовірні параметри плану лінії за результатами заїздів КВЛ
3	Зйомка рихтувальними машинами з системою «Навігатор», «Стріла».	Точна системами виміру пройденого шляху; невелика асиметрія, висока точність виміру стріли вигину.

Таблиця 2. Класифікація способів зйомки плану лінії, що використовуються в проектних організаціях

Способи зйомки плану лінії в проектних організаціях		Пояснення
1	Спосіб Гонікберга	При вимірах способом Гонікберга емпірична крива розподілу помилок була апроксимована кривою нормального розподілу з параметрами $\Delta \bar{f} = 0, \sigma_{\Delta f} = 3,3 \text{ мм}$ [5]
2	Координатна зйомка за допомогою електронних тахеометрів	Дозволяє з високою точністю встановити просторове положення ділянки, але з-за похибок визначення координат окремих точок (до 20 мм) не дає реального співвідношення кривизни сусідніх точок колії при їх близькому розташуванні.
3	Застосуванням GPS-приймачів	Точність на рівні електронних тахеометрів такі приймачі дають лише при диференціальній схемі і стоянці на кожній точці впродовж достатньо довгого проміжку часу, що не дозволяє виконати таку зйомку безпосередньо на колії.

Традиційні технології не дозволяють вирішувати задачу модернізації плану лінії на належному рівні. Якщо зйомка плану для проектування реконструкції може виконуватися координатними методами, то точності такої зйомки буде недостатньо в поточному утриманні й ремонті колії, оскільки похибка визначення координат окремих точок складатиме 10-20 мм. Водночас зйомка кривих симетричним або асиметричним методами стріл будуть давати зростаючу похибку по довжині кривої [6].

При зйомці й рихтуванні поодиноких, не дуже довгих кривих колієрихтувальними машинами точність виявляється достатньою, щоб забезпечити нормативи з утримання, але для побудови плану і профілю ділянок результати вимірювань мають високу невизначеність. Це пов'язано з тим, що кут повороту практично визначається підсумовуванням зміряних стріл, а положення колії в просторі – подвійним підсумовуванням. Оскільки вимірювання виконуються з точністю 0,1 мм на відстанях менше метра, невизначеність положення кінця зміряної ділянки після подвійного підсумовування стріл виявляється дуже великою. Без додаткового зрівнювання результатів заїзду із зміряними координатами окремих точок ця інформація також буде недостовірною [6].

Для детальних розрахунків плану лінії з метою підвищення швидкостей необхідні високоточна координатна зйомка існуючого плану двох колій, рихтування плану за наслідками цих розрахунків і перевірка виконаного рихтування відповідно до «Методики аналізу точності знімання, розрахунків та виправлення залізничних кривих машинами різних типів / ЦП-0164». Реалізація такої зйомки і забезпечення в подальшому утримання плану колії на належному рівні можливі тільки при створенні єдиної реперної системи Укрзалізниці.

Техніко-економічні показники оцінки проектних рішень

Ефективність проектних рішень визначає якість проекту в цілому і доцільність його реалізації зокрема. Для вибору найбільш якісного проектного рішення використовується система показників, що характеризують кількісні і якісні властивості об'єкта. Сукупність цих показників дає об'єктивну оцінку доцільності перебудови кривої й економічну ефективність.

Економія часу, що спостерігається при реконструкції плану залізниці, відноситься до найбільш загальних показників ефективності і широко застосовується в теорії проектування залізниць (час руху поїзда, час обороту локомотива і вагона, час поїздки пасажирів, часові інтервали). Крім того, час входить у розмірність багатьох показників ефективності, наприклад, таких як швидкість, пропускна й провізна спроможність.

Визначення ефективності проектного рішення здійснюється за допомогою показників загальної і порівняльної ефективності інвестиційних витрат [7]. До показників загальної ефективності проектних рішень відносяться чистий дисконтований дохід, індекс прибутковості, внутрішня норма дисконту, строк окупності інвестицій. До порівняльних показників відносять порівняльний інтегральний ефект, приведені будівельно-експлуатаційні витрати і строк окупності додаткових інвестицій.

Як відомо інвестиційні витрати в залізничному будівництві виступають у формі капіталовкладень K . З використанням програми RWPlan і методики, що передбачає урахування відповідних робіт з перебудови кривої [6], була розрахована за формулою (1) вартість по кожному варіанту, що розглядається

$$\hat{E} = \sum_{i=1}^{i=4} \dot{a}_i l_i + \sum_{i=5}^{i=7} \dot{a}_i l_i + \sum_{i=8}^{i=10} \dot{a}_i Q_i, \quad (1)$$

де \dot{a}_1, \dots, a_4 – витрати на зміщення осі існуючої колії відповідно до 60 мм, 61-120 мм, 121-120 мм і більше 250 мм;

l_1, \dots, l_4 – довжина ділянок з відповідним діапазоном зсувів;

\dot{a}_5, \dots, a_7 – витрати відповідно на перекладання верхньої будови колії, перенесення контактної мережі, пристроїв СЦБ;

l_5, \dots, l_7 – довжина ділянок перекладання колії, перенесення контактної мережі, кабелів СЦБ;

\dot{a}_8, \dots, a_{10} – вартість 1 м³ баласту, ґрунту для розширення існуючого земляного полотна та ґрунту для відсіпання земляного полотна на новій трасі;

Q_8, \dots, Q_{10} – об'єм баласту, ґрунту для розширення існуючого земляного полотна та ґрунту для відсіпання нового земляного полотна.

При рихтуванні колії на відстань більшу за 60 мм будуть виникати додаткові обсяги робіт, які пов'язані з роботами по контактній мережі та досипці баласту. А якщо зсув перевищує задане значення (наприклад, a_4), то замість витрат на рихтування підраховуються витрати на перекладання колії, перенесення контактної мережі і пристроїв СЦБ.

Визначення проектних параметрів плану на прикладі ділянки залізниці Львів – Зборів

Один із способів зменшення розладу залізничної колії в кривих полягає у визначенні їх раціональних параметрів. З цією метою були розглянуті наступні варіанти:

Варіант 0. Розрахунки допустимої швидкості руху для початкового стану колії.

Варіант 1. В цьому варіанті розглядається можливість максимального підняття швидкості руху поїздів на окремих кривих. Допускається зміщення вісі колії в межах існуючого земляного полотна. Умовно прийнято, що в цьому випадку рихтування не повинні перевищувати 250-300 мм.

Варіант 2. В цьому варіанті також розглядається можливість максимального підняття швидкості руху поїздів в окремих кривих, але допускається зміщення вісі колії в межах смуги відведення.

Варіант 3. В цьому варіанті розглядається можливість максимального підняття швидкості руху поїздів на ділянках колії, які включають декілька суміжних кривих. Умовно прийнято, що для того, щоб залишити колію в межах існуючої смуги відведення допустимі зміщення вісі не перевищують 15 метрів.

На ділянці Львів-Зборів можлива реалізація максимально встановленої швидкості 160 км/год по варіантам коливається від 5 до 42 % (рис. 1).

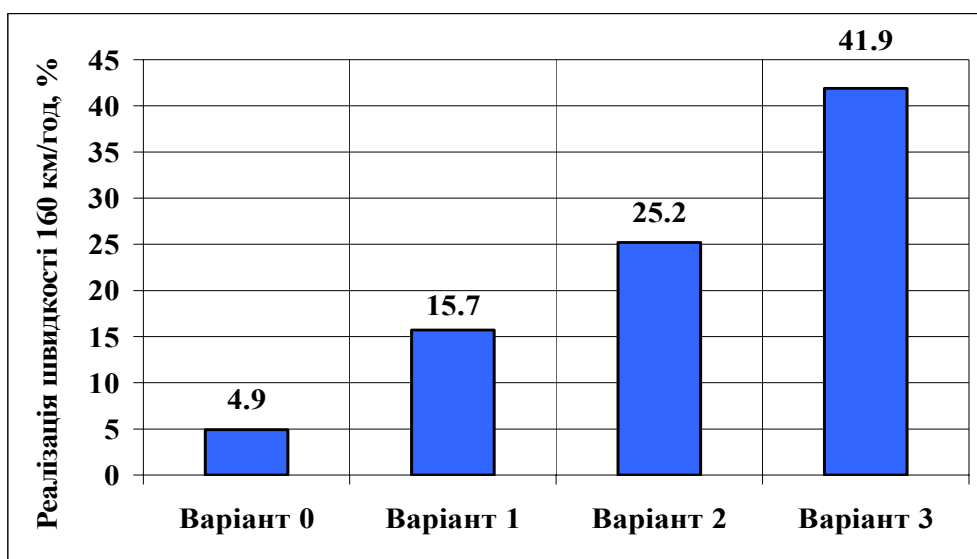


Рис. 1. Реалізація максимальної швидкості 160 км/год на ділянці Львів-Зборів

Об'ємно-вартісні показники по варіантам перебудови плану лінії наведено в таблиці 3.

Таблиця 3. Об'ємно-вартісні показники по варіантам

Показники	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Довжина проектна (м)	77 374	77 359	77 317
Вартість, млн. грн.	0,796	72,790	635,456
Довжина (м) рихтувань:			
- до 60 мм	62 733	13 613	1 441
- до 120 мм	9 024	25 800	1 919
- до 250 мм	5 104	11 156	1 312
>250 мм	568	23 706	35 650
Довжина (м) перекладання колії		3 154	37 107
Довжина (м) перебудови СЦБ і контактної мережі		21 498	72 270
Об'єм (м. куб.)			
- щебеневого баласту	1312	26 190	153 049
- ґрунту, що додається		269 155	2 115 426
- нового земляного полотна			1 073 251

З використанням програми MoveRW були виконані варіантні тягові розрахунки для такого рухомого складу: столичні експresi (600 т), пасажирські (1000 т), вантажні (4600/2800 т) і приміські (400 т), таблиця 2.

Таблиця 4. Результати тягових розрахунків

Показники	Початковий стан	Варіант 1		Варіант 2		Варіант 3		
		показник	економія відносно початкового	показник	економія відносно початкового	показник	економія відносно початкового	
1	2	3	4	5	6	7	8	
Столичні експresi								
Час ходу, хв.	Туди	45,2	36,1	9,1	33,9	11,3	32,6	12,6
	Звор.	45,2	36,1	9,1	33,9	11,3	32,6	12,6
Середньоходова швидкість: км/год	Туди	101	126		135		140	
	Звор.	101	126		134		140	
Витрати ел. енергії, кВт-год	Туди	3686	3120	566	2973	713	2573	1113
	Звор.	3720	3196	524	3031	689	2683	1037
Економія на пару поїздів на добу за рік, тис. грн.			211		271		416	
Економія на 2 пари поїздів на добу, грн.			422		542		832	
Пасажирські								
Час ходу, хв.	Туди	52,0	46,7	5,2	44,1	7,8	43,6	8,4
	Звор.	52,0	46,9	5,2	44,3	7,7	43,8	8,3
Середньоходова швидкість: км/год	Туди	88	98		103		105	
	Звор.	88	97		103		104	
Витрати ел. енергії, кВт-год	Туди	3800	3454	346	3091	709	2889	911
	Звор.	3704	3377	327	3038	666	2865	839
Економія на пару поїздів на добу за рік, тис. грн.			130		266		339	
Економія на 40 пар поїздів на добу, грн.			5208		10640		13542	

Продовження табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	
Приміські								
Час ходу, хв.	Туди	52,0	54,1	49,7	4,4	47,6	6,5	47,3
	Звор.	52,0	53,9	49,7	4,2	47,4	6,6	46,9
Середньоходова швидкість: км/год	Туди	84	92		96		96	
	Звор.	85	92		96		97	
Витрати ел. енергії, кВт-год	Туди	665	618	47	577	88	552	113
	Звор.	652	609	43	582	70	563	89
Економія на пару поїздів на добу за рік, тис. грн.				17		31		39
Економія на 8 пар поїздів на добу, грн.				139		245		313
Вантажні масою 4600 т								
Час ходу, хв.	Туди	78,4	74,7	3,7	73,0	5,4	72,9	5,5
	Звор.	76,8	73,3	3,5	72,1	4,7	71,9	4,8
Середньоходова швидкість: км/год	Туди	58	61		62		63	
	Звор.	59	62		63		63	
Витрати ел. енергії, кВт-год	Туди	6313	6040	273	5874	439	5880	433
	Звор.	5902	5660	242	5414	488	5421	481
Економія на пару поїздів на добу за рік, тис. грн.				100		179		177
Економія на 8 пар поїздів на добу, грн.				797		1435		1415
Вантажні масою 2800 т								
Час ходу, хв.	Туди	73,9	70,3	3,6	69,1	4,8	69,0	4,9
	Звор.	73,3	69,7	3,6	68,7	4,6	68,6	4,7
Середньоходова швидкість: км/год	Туди	62	65		66		66	
	Звор.	62	65		66		66	
Витрати ел. енергії, кВт-год	Туди	4228	3990	238	3826	402	3829	399
	Звор.	3945	3737	208	3553	392	3556	389
Економія на пару поїздів на добу за рік, тис. грн.				86		154		152
Економія на 8 пар поїздів на добу, грн.				690		1229		1220
Очікуваний річний ефект за рахунок економії електроенергії, млн. грн.				7,26		14,09		17,32
Термін окупності витрат на перевлаштування плану тільки за рахунок економії електроенергії, років				0,1		5		37

За результатами розрахунків (див. табл. 4) можна вважати, що в умовах обмеженого фінансування найбільш ефективним є варіант модернізації плану колії (варіант 1) з реалізацією максимальної швидкості 160 км/год близько 16 % від загальної довжини ділянки при рихтуваннях колії в межах основної площадки земляного полотна. Характеристики кривих, що відповідають варіанту 1, забезпечують всі вимоги до плану лінії для встановленої максимальної швидкості 160 км/год. Аналогічні дослідження були проведені й на інших ділянках залізниць.

Висновок

Проведений аналіз плану лінії на складних ділянках транспортних коридорів і розрахунки за вище наведеною методикою підтвердили необхідність урахування обсягів робіт, витрат на перебудову кривих та економію тягово-енергетичних ресурсів для встановлення раціональних параметрів плану відповідно до заданого рівня максимальної швидкості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України. ЦП-0113. – К., 2004. – 32 с.
2. Про підготовку інфраструктури до впровадження прискореного руху поїздів на напрямках Київ-Полтава-Красноград-Лозова-Донецьк, Київ-Коростень-Здолбунів-Львів / Наказ №159-Ц від 22.04.2011 р.
3. *Бердута В.* Радиус для скоростного // *Магістраль.* – 2011. – №36 (1619). – С. 6.
4. *Туровский И. Я.* Каким способом замерять кривые? // *Путь и путевое хозяйство.* –1965. – №8. – С. 26-28.
5. *Проценко А. И., Фишер В. А.* Ошибки измерения кривизны на железнодорожных кривых по способу Гоникберга и влияние этих ошибок на точность определения параметров кривых // *Труды НИИЖТа.* – 1976. – Вып. 184. – С. 40-50.
6. *Корженевич І. П.* Нові можливості проектування перебудови плану та виправлення кривих при використанні програми RWPlan 1.2 / *Залізничний транспорт України,* №5. – С. 79-82.
7. *Кулаев Ю. Ф.* Методы экономической оценки инвестиционных проектов на транспорте: Учеб.-метод. пособие / Сост. Ю. Ф. Кулаев, - К.: Транспорт Украины, 2001. – 182 с.