

## ВПЛИВ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ПОЇЗДІВ НА ВИТРАТИ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ

Розглядається вплив підвищення швидкості руху поїздів на витрати енергоресурсів.

Рассматривается влияние повышения скорости движения поездов на расход энергоресурсов.

Influence of the increase of train speed on the consumption of power resources is under consideration.

### 1. Основні положення

Організація руху поїздів з раціональними для конкретних умов експлуатації швидкостями має важливе значення для зниження експлуатаційних витрат. Раціональною вважається така швидкість, за якої окупаються витрати на її реалізацію.

Останнім часом в Україні проводиться багато досліджень, пов'язаних з підвищенням швидкості руху поїздів. При цьому в основному аналізуються витрати на реалізацію такого підвищення і скорочення часу руху. В той же час підвищення швидкості вочевидь призводить до збільшення енергоресурсів і витрат на утримання інфраструктури [1-3]. Під енергоресурсами будемо розуміти механічну роботу сили тяги локомотива (або роботу сил опору), витрати електроенергії чи дизельного палива.

Недоліки існуючих методів економічної оцінки вартості часу пасажирів та соціальних ефектів від скорочення тривалості подорожі не дозволяють виконати повноцінну оцінку економічного ефекту від підвищення швидкості руху поїздів. Необхідний сучасний підхід, який би враховував зміну енергоресурсів та витрат на утримання інфраструктури при збільшенні швидкості руху поїздів.

Відомо, що факторами, які впливають на знос інфраструктури залізниці, з однієї сторони є механічна робота сили тяги локомотива  $R_m$  і робота сил опору руху  $R_c$ , з іншої – пропущений тоннаж  $G$  і осьове навантаження  $q_o$ . Два останніх фактори надалі будуть визначатися роботою вертикальних сил  $R_b$ , що діють на колію. Такий підхід дозволяє враховувати структуру поїздопоту та інтенсивність руху поїздів.

Крім названих факторів потрібно дослідити роботу бічних сил  $R_g$ , що діють в горизонталь-

ній площині, а також роботу гальмівних сил  $R_b$ .

Механічна робота сил опору визначає ступінь зносу ходових частин рухомого складу і верхньої будови колії і складається з роботи сил опору руху  $R_w$  і роботи гальмівних сил  $R_b$ , яка має місце на ділянках гальмування, тобто

$$R_c = R_w + R_b \quad (1)$$

Ураховуючи мету дослідження, аналізу піддавались складові опору руху, які виникають при взаємодії рухомого складу і колії.

**Опір від кочення коліс по рейках.** При коченні колеса по рейці відбувається стискання колеса і рейки у вертикальній площині, прогин рейки як балки, тертя дотичних поверхонь колеса, рейки, шпал і баласту. Величина стискання колеса і рейки пропорційна модулю пружності металу. Вплив прогину колії на опір руху до останнього часу мало досліджений.

При набіганні колеса на рейку і прогині останнього, зі сторони рейки виникає деяка реактивна сила  $AB$  (рис. 1).

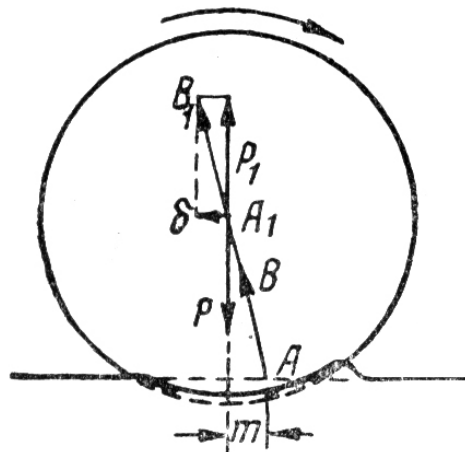


Рис. 1. Сили, що викликають опір від кочення колеса по рейці

Унаслідок деформації і прогину рейки точка прикладення реакції рейки зміщується вперед на величину  $m$ . Величина  $m$  залежить від якості і стану рейкової колії. Можна припустити, що сила  $AB$  проходить через центр колеса (фактично вона відхилена дещо вперед) і дорівнює  $A_1B_1$  [6]. Розкладемо останню на дві складові  $P_1$  і  $\delta$ . Складові  $P_1$  дорівнює навантаженню від колеса  $P$  і зрівноважує її. Складові  $\delta$  є силою опору кочення колеса і приблизно дорівнює  $\delta \approx m \frac{P_1}{R}$ , тобто обернено пропорційна

радіусу колеса  $R$  і зменшується при збільшенні жорсткості поверхні колеса і рейки. Величина цього опору залежить як від типу рухомого складу, осового навантаження, так і від типу й технічного стану верхньої будови колії.

**Опір від тертя ковзання між колесом і рейкою.** Одночасно з коченням колеса відбувається частково і прослизання його по рейці. Це ковзання є слідством конусності профілю кочення колеса і звивистості руху вагона.

Колесо торкається рейки овальною площиною довжиною  $ab$  (рис. 2), унаслідок чого точки  $a$  і  $b$  лежать на колах різних радіусів ( $R_I$  і  $R_{II}$ ). Кочення колеса без ковзання можливе тільки у випадку одного радіуса  $R$ . Із-за нерівності кіл кочення колісна пара котиться з вилянням, тобто під час поступального руху переміщується в поперечному напрямку то в одну, то в іншу сторону. Ступінь виляння залежить від багатьох факторів, в тому числі від поздовжньої сили і стану устроїв зчеплення (в поїздах, що рухаються на підйом, виляння менше, ніж при русі на спуск). Характер виляння залежить також від характеру зносу і ступеня конічності бандажів.

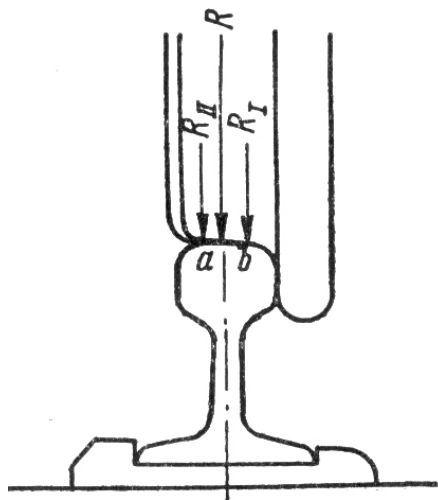


Рис. 2. Торкання колеса з рейкою

**Опір від ударів і коливань.** Рух поїздів супроводжується ударами на стиках рейок унаслідок нерівностей колії в профілі й плані, наявності вибоїн на колесах тощо. При кожному ударі жива сила поїзда зменшується, так як деяка її частина витрачається на механічну роботу удару. Втрату живої сили вагону масою  $P$  від ударів на стиках приблизно можна визначити за формулою  $P(aV + bV^2)$ , де  $a, b$  - коефіцієнти, що залежать від величини зазорів у рейках, жорсткості колії та пружних властивостей ресор [6].

## 2. Розробка тягово-експлуатаційної моделі

Вищенаведені основні положення були враховані при розробці тягово-експлуатаційної моделі. Програма дозволяє визначати допустиму швидкість руху поїздів в кривих, виконувати тягові розрахунки, оцінювати комфортабельність їзди, визначати механічну роботу сили тяги локомотива, роботу сил опору, роботу гальмівних сил, а також роботу вертикальних і горизонтальних сил.

## 3. Дослідження впливу параметрів траси й експлуатаційних факторів на знос колійної інфраструктури

Для аналізу впливу підвищення швидкості руху на зношення колійної інфраструктури були виконані тягові розрахунки спочатку на еталонних ділянках, потім – на існуючих реальних. Еталонні ділянки відрізнялись своїми параметрами, що дозволило провести факторний аналіз. Так, розглядався поздовжній профіль ділянок різного абрису із зміною крутизни ухилів від 4 до 20 ‰. План лінії враховувався через питому вагу кривих, яка змінювалась від 10 до 80 % від довжини ділянки, і середній радіус – від 400 до 2000 м. Передбачалось, що на таких ділянках рухаються поїзди різних категорій і норм маси і відповідно до цього задавались допустимі швидкості прослідування роздільних пунктів від 60 до 120 км/год, а максимально допустимі на перегонах – від 80 до 160 км/год.

Для зменшення помилки апроксимації, поперше, були відокремлені тепловозна та електрична тяги. По-друге, окремо розглядалися вантажні, приміські і пасажирські поїзди, а також поїзди типу «Столичний експрес». По-третє, в окремі групи біли виділені ділянки за середнім уклоном поздовжнього профілю  $i_{\text{середн.}}$  (легкий, середній та важкий за такою градацією:

$$i_{\text{середн.}} \leq 6\text{‰} \text{ — легкий профіль;}$$

$6\text{‰} < i_{\text{середн.}} \leq 9\text{‰}$  – середній профіль;

$9\text{‰} < i_{\text{середн.}}$  – важкий профіль.

Для пасажирських поїздів та експресів, крім того, введено розподілення за складністю плану лінії через середній радіус (з урахуванням прямих ділянок):

$R_{\text{середн.}} \geq 2000$  м – легкий план;

$2000 \text{ м} > R_{\text{середн.}} \geq 1000$  м – середній план;

$1000 \text{ м} > R_{\text{середн.}}$  – важкий план.

Для визначення впливу показників еталонних ділянок на фактори, що призводять до зносу колії, було виконано близько мільйона розрахунків, за результатами яких отримані кореляційні зв'язки між характеристиками еталонних ділянок та тягово-енергетичними факторами. Було встановлено, що найбільш тісні зв'язки існують між факторами, що призводять до зносу залізничної колії (робота сил опору і гальмівних сил, робота бокових і вертикальних сил), видом тяги і типами поїздів,

складністю плану й профілю, швидкістю руху і масою поїздів, а також довжиною перегону.

Запропонована методика була використана в реальних умовах експлуатації. Результати виконаних розрахунків наведені для ділянок, що відрізняються показниками плану та профілю: Київ – Львів, Дарниця – Лозова, Красноград – Дніпропетровськ, Лозова – Сімферополь для однієї категорії поїздів «Столичний експрес» при різних значеннях максимальної швидкості поїздів (100...160 км/год).

Для прикладу на рис. 3 показана зміна механічної роботи сили тяги локомотива. З рисунку видно, що значення цього фактору суттєво змінюються по довжині лінії, що залежить від параметрів поздовжнього профілю, плану, наявності обмежень швидкості, режиму ведення поїзду, швидкості руху тощо. Отже і вплив на знос колійної інфраструктури буде різний. Тому при виконанні порівняльних розрахунків треба поділяти такі ділянки на окремі складові з однорідними параметрами.

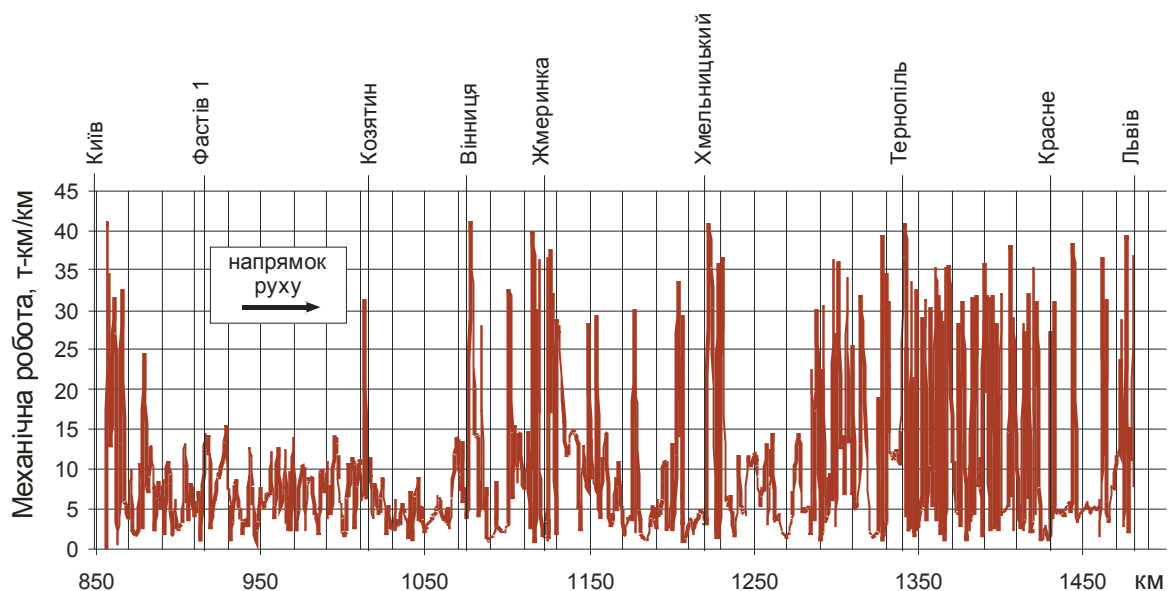


Рис. 3. Зміна механічної роботи при русі пасажирського поїзда за напрямком Київ – Львів

В табл. 1 наведено порівняння механічної роботи сили тяги локомотива ЧС8, маса поїзда 1100 т на напрямку Київ-Львів, отриманої за результатами тягових розрахунків і за методикою, що запропонована.

Для кожного з варіантів були отримані значення часу руху та витрати енергоресурсів і визначені питомі значення скорочення часу руху ( $\Delta t$ , с/км) та збільшення витрат енергоресурсів ( $\Delta R_m$ , %) порівняно з максимальною швидкістю 100 км/год (табл. 2).

З табл. 2 видно, що збільшення швидкості призводить до суттєвого зростання витрат енергоресурсів. При швидкості 160 км/год ці витрати зростають майже втричі.

На рис. 4 наведено графічне відображення залежності  $\Delta t$  від підвищення максимальної швидкості руху поїздів  $\Delta V$  відносно швидкості 100 км/год. Середні значення цього підвищення, які на графіку представлено пунктирною лінією, можуть бути описані рівнянням

$$\Delta t = 0,0025\Delta V^2 + 0,285\Delta V.$$

Таблиця 1

**Порівняння механічної роботи сили тяги локомотива  
за результатами тягових розрахунків і запропонованою методикою**

Ділянка	Механічна робота, т-км		Співвідношення, %
	за тяговими розрахунками	за методикою	
Київ-Пас. – Фастів-1	419	462	10.3
Фастів-1 – Козятин-Пас.	517	581	12.4
Козятин-Пас. – Вінниця	353	383	8.5
Вінниця – Жмеринка-Пас.	395	294	25.6
Жмеринка-Пас. – Хмельницький	752	619	17.7
Хмельницький – Підволочиськ	488	413	15.4
Підволочиськ – Тернопіль	400	319	20.2
Тернопіль – Красне	1008	832	17.5
Красне – Львів	418	366	12.4

Таблиця 2

**Скорочення часу руху та збільшення механічної роботи сили тяги локомотива в залежності  
від рівня максимальної швидкості, км/год**

Назва ділянки	Довжина, км	$V_{\max} = 120$		$V_{\max} = 140$		$V_{\max} = 160$	
		$\Delta t$	$\Delta R_M$	$\Delta t$	$\Delta R_M$	$\Delta t$	$\Delta R_M$
Київ – Фастів	63.3	0.6	33	0.5	04	0.3	73
Фастів – Козятин	94.7	5.9	20	9.0	78	11.0	170
Козятин – Жмеринка	109.0	5.6	21	7.6	95	8.2	161
Жмеринка – Підволочиськ	164.8	5.5	29	8.0	104	8.8	173
Підволочиськ – Тернопіль	51.2	3.1	57	4.6	105	5.2	141
Тернопіль – Красне	89.5	3.5	99	4.7	178	5.0	223
Красне – Львів	50.5	4.7	53	6.9	127	7.8	201
Дарниця – Гребінка	132.0	5.9	24	9.8	67	13.0	138
Гребінка – Полтава	203.6	4.1	44	6.2	98	6.9	143
Полтава – Лозова	80.2	3.3	52	4.5	111	4.9	138
Красноград – Дніпропетровськ	127.9	5.5	46	7.8	134	8.6	196
Лозова – Запоріжжя	167.6	5.7	31	8.3	98	9.4	165
Запоріжжя – Мелітополь	111.7	5.7	39	8.3	134	9.3	197
Мелітополь – Сімферополь	244.4	5.9	22	9.2	80	11.0	153
Середні значення		5.0	41	7.3	108	8.4	169

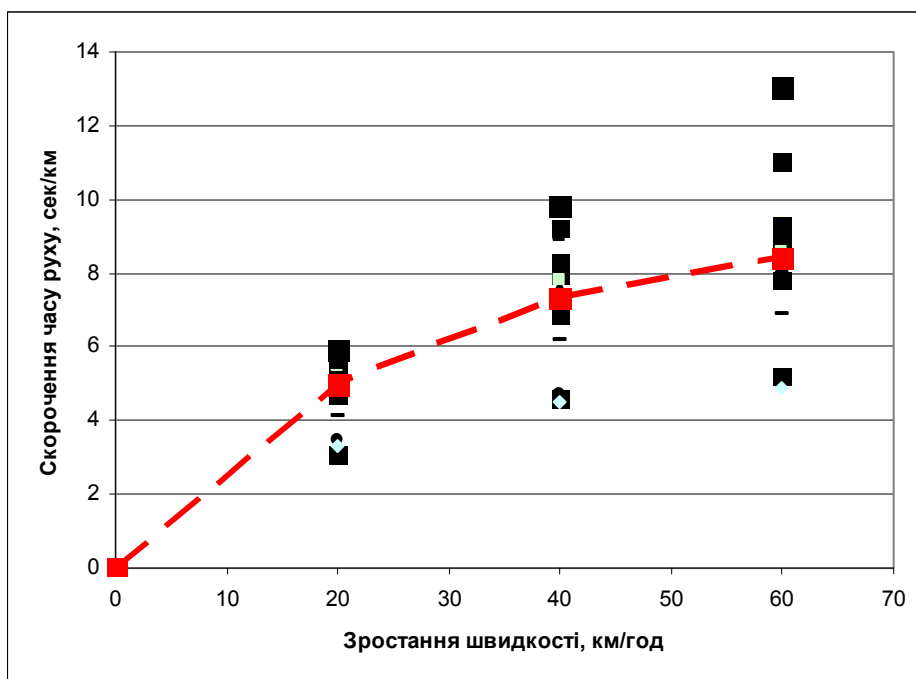


Рис. 4. Питома економія часу руху в залежності від підвищення швидкості

На рис. 5 наведено графічне відображення залежності  $\Delta R_m$  від підвищення максимальної швидкості руху поїздів  $\Delta V$  відносно швидкості

100 км/год, а середні значення цього підвищення, які на графіку представлено пунктирною лінією, описані рівнянням  $\Delta R = 0.013\Delta V^2 + 2.1\Delta V$ .

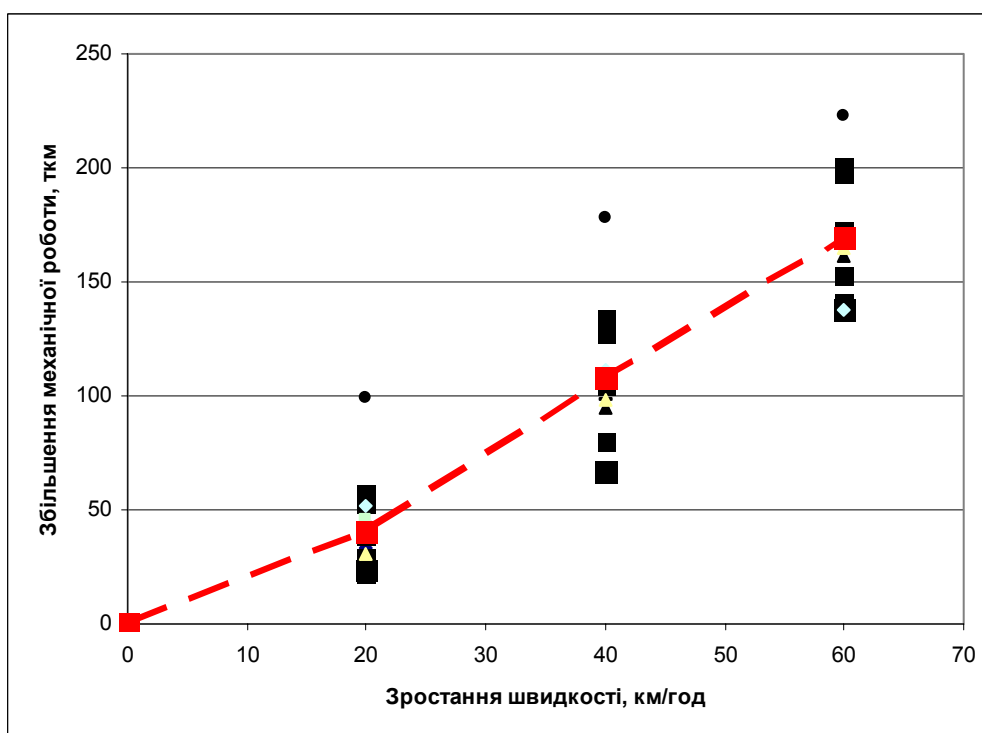


Рис. 5. Питоме збільшення витрат енергоресурсів в залежності від підвищення швидкості

Загальна дія рухомого складу, що призводить до зносу колійної інфраструктури, визначалась за формулою

$$D = D_{\text{позд.}} + D_{\text{поп.}} + D_{\text{верт.}}$$

Поздовжня дія рухомого складу на колію  $D_{\text{позд.}}$  складається з механічної роботи та роботи сил гальмування і з достатньою для даного дослідження точністю для кожної категорії поїздів може визначатися за наступною формулою

$$D_{\text{позд.}} = \frac{Q \cdot L}{1000} \cdot \left( a + \frac{b \cdot Q + c \cdot l_{\text{пер.}}}{1000} \right),$$

де  $Q$  – маса поїзду, т;

$L$  – довжина ділянки, км;

$l_{\text{пер.}}$  – середня довжина перегону, км;

$a, b, c$  – коефіцієнти апроксимації.

Як показали розрахунки, дію вертикальних сил  $D_{\text{верт.}}$  можна представити через дію поздовжніх сил за допомогою коефіцієнтів

$$D_{\text{верт.}} = k_{\text{верт.}} \cdot k_{\text{стан}} \cdot D_{\text{позд.}}$$

Середнє співвідношення між поздовжньою та вертикальною діями  $k_{\text{верт.}}$  при стані залізничної колії після ремонту ( $k_{\text{стан}} = 1$ ), що оцінюється як «добре», складає 0.05 для пасажирського руху, при електричній тязі 0.10 – для вантажного руху та 0.15 – при тепловозній. Якщо колія знаходиться в стані, що потребує негайного ремонту, то  $k_{\text{стан}} = 3.2$ . Для міжремонтного періоду приймається  $k_{\text{стан}} = 1.7$ . Детально це питання розглянуто в роботі [7].

Дію поперечних сил  $D_{\text{поп.}}$  можна визначити

за формулою

$$D_{\text{поп.}} = Q \cdot L_{\text{кр}} \cdot K_{\text{поп.}},$$

$$\text{де } K_{\text{поп.}} = \frac{\sqrt{V_{\text{ср}}^4 - 9720 V_{\text{ср}}^2 + 2.36 \cdot 10^7}}{850 R_{\text{ср}}};$$

$L_{\text{кр}}$  – загальна довжина кривих на ділянці, км;

$V_{\text{ср}}$  – середня швидкість руху, км/год;

$R_{\text{ср}}$  – середній радіус кривих, м.

Як показали розрахунки, для пасажирських поїздів дія вертикальних сил  $D_{\text{верт.}}$  може визначатися через поздовжню дію за допомогою коефіцієнту 0.05, а  $D_{\text{поп.}}$  – через коефіцієнт  $\Delta V$ , який визначається через збільшення швидкості відносно 100 км/год за наступною формулою

$$k = 0.05 + 0.003 \Delta V.$$

Таким чином, загальний вплив на колію для розглянутих в роботі вихідних даних може бути представлено через роботу поздовжніх сил

$$D = (0.1 + 0.003 \Delta V) \cdot D_{\text{позд.}}$$

Математичні очікування  $m$  значень часу руху  $t$  (с/км) та  $D_{\text{позд.}}$  (ткм, віднесені до 1-го кілометра та 1-ї тони маси поїзду) та їх середньоквадратичні відхилення  $\sigma$  (%), отримані за результатами розрахунків на еталонних ділянках, наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Математичні очікування часу руху та робота поздовжніх сил

$V_{\text{max}},$ км/год	Кількість варіантів	$t$		$D_{\text{позд.}}$	
		$m_t$	$\sigma_t$	$m_D$	$\sigma_D$
100	1999	42.1	9	13.6	40
120	90000	41.8	22	18.9	38
140	40115	39.8	25	23.0	39
160	30000	36.6	21	21.0	37

Зростання витрат на утримання інфраструктури  $\Delta D$  (%), в залежності від підвищення швидкості, представлено на рис. 6. На цьому ж

рисунку пунктиром показана апроксимуюча залежність  $\Delta D = 0.035 \Delta V^2 + 3.5 \Delta V$ .



Рис. 6. Зростання витрат на утримання колійної інфраструктури (%) в залежності від збільшення максимальної швидкості руху поїздів

Деяке зменшення витрат на утримання інфраструктури в кінці графіку пов'язано зі зменшенням гальмувань.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Отримані аналітичні залежності характеризують вплив основних факторів (довжини ділянки, типу рухомого складу, швидкості руху, стану залізничної колії тощо) на знос залізничної колії. Коефіцієнти кореляції визначають зв'язок між кількісними показниками впливу на колію та якісним станом колійної інфраструктури. Такий підхід дає можливість давати попередню оцінку впливу різних факторів на знос колійної інфраструктури, не виконуючи багатоваріантних тягових розрахунків та тривалих статистичних спостережень.

2. Оскільки в подальших розрахунках важливими є не абсолютні значення тих чи інших показників, а їх співвідношення, то апроксимуючі залежності можуть використовуватися для розрахунків частки кожного поїзду та груп поїздів в загальних витратах на утримання інфраструктури.

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Корженевич І. П. Деякі економічні аспекти впровадження швидкісного руху на залізницях України / І. П. Корженевич, М. Б. Курган, В. В. Савченко // Транспорт: Зб. наук. праць ДПТУ, Вип. 8. – Д., 2001. – С. 74-82.

2. Кирпа Г. Н. Повышение скоростей движения поездов на магистрали Львов – Мостиска II – Государственная граница / Г. Н. Кирпа, И. П. Корженевич, Н. Б. Курган // Проектирования, производство та эксплуатация автотранспортных средств и поездов. Праці Зах. Наук. центру, Львів, 2000, № 7. – С. 76-78.
3. Курган М. Б. Аналіз роботи залізниць України з позиції впливу інтенсивності перевезень на знос інфраструктури / М. Б. Курган, І. П. Корженевич, Ю. С. Бараш, Н. І. Верхоглядова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, Вип. 19. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 265-270.
4. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
5. Гребенюк П. Т. Тяговые расчеты: Справочник / Под ред. П. Т. Гребенюка / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, А. И. Скворцова. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
6. Бабичков А. М. Тяга поездов / А. М. Бабичков, В. Ф. Егорченко. – М.: Трансжелдориздат, 1955. – 356 с.
7. Курган Д. М. Вплив стану залізничної ділянки і структури поїздопотоку на життєвий цикл колії / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, Вип. 19. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 78-83.

Надійшла до редколегії 26.02.2008.