

Д. М. КУРГАН¹, М. О. ГАВРИЛОВ²

¹к.т.н., доцент каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс + 38 (056) 3731542, ел. пошта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

²асистент каф. «Проектування і будівництво доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс +38(056) 3731548, ел. пошта max@brailsys.com

ДІАГНОСТУВАННЯ І ВИПРАВКА ПОЛОЖЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ КОЛІЙНИМИ МАШИНАМИ

Ціль. Проаналізувати сучасні проблеми щодо оцінки та відновлення стану колії за її геометричним положенням колійними машинами. Показати складності щодо обґрунтування допустимої швидкості руху за геометрією плану колії, отримати напрямки вирішення задач виміру плану з відповідною точністю. Надати рішення поставлених задач на прикладі модернізації комп'ютерних систем для колійних машин. **Методика.** Розглянуто практичні формули розрахунку положення колії та встановлення допустимою швидкості руху у відповідності до сучасних фізико-математичних методів. Показано порівняння теоретичних розрахунків горизонтального прискорення з результатами експериментальних вимірювань. **Результати.** Існуючі методи розрахунку допустимої швидкості за характеристиками плану повинні корегуватися для урахування динамічних явищ, що набирають важливості при зростанні швидкостей руху. Визначення реального положення колії, навіть з використанням сучасних колійних машин, є складною математичною задачею, яка може бути вирішена тільки в заданому діапазоні точності. **Наукова новизна.** Набули подальшого розвитку задачі встановлення допустимих швидкостей руху поїздів та визначення реального положення колії за результатами виміру колійними машинами. **Практична значимість.** Запропоновані напрямки розвитку вимірювальних засобів сучасних колійних машин на прикладі застосування комп'ютерної системи «Стріла» на ВПР-02.

Ключові слова: виправка колії, рихтування колії, метод стріл, залізнична крива, стан колії, непогашене прискорення, допустима швидкість.

Вступ

Сьогодні Україна активно інтегрується в європейську транспортну мережу. Курсують швидкісні поїзди, що з'єднують Київ з такими містами як Одеса, Тернопіль, Львів, Дніпропетровськ, Харків та ін. Проте в Україні й досі для пасажирських перевезень використовуються ділянки загального користування. Тому при зростанні швидкостей руху поїздів особливу увагу слід приділяти питанням утримання існуючих ділянок колії, особливо в кривих, що призводять до встановлення обмежень швидкостей, зменшення строків між ремонтами та збільшенню експлуатаційних витрат. Підтримання стану колії на відповідному рівні потребує застосування сучасних колійних машин, оцінки їх можливостей та напрямків розвитку для діагностування і виправки положення залізничної колії.

1. Допустимі швидкості руху, що визначаються геометричним положенням колії в плані

При визначенні рівня допустимої швидкості руху за параметрами плану лінії повинно бути враховано наступне: кожний напрямок характеризується двома категоріями швидкостей – максимальною й маршрутною. Перша служить характеристикою загального рівня застосовуваної залізничної техніки, друга – інтегральним вираженням впливу експлуатаційних умов: організації руху, стану колії та ін. Кінцевий результат перевезень, тобто час доставки вантажів і пасажирів, визначається маршрутною швидкістю.

В якості основних критеріїв для визначення швидкості, що допускається при руху в кривій, зараз використовуються три [1, 2]: непогашене прискорення – α_{ir} , м/с², швидкість зміни непогашеного прискорення – Ψ , м/с³ і швидкість підйому колеса по відводу підвищення зовнішньої рейки – f , мм/с (або тотожній до останнього – ухил відводу підвищення i , мм/м).

Непогашене прискорення являє собою різницю між доцентровим прискоренням, що виникає при русі екіпажу по колу, і гравітаційним прискоренням, що виникає при улаштуванні підвищення зовнішньої рейки в кривій, для компенсації дії першого. Швидкість зміни непогашеного прискорення – це перша похідна непогашеного прискорення за часом. Швидкість підйому колеса по відводу підвищення – похідна зміни підвищення в часі:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{ir} &= \frac{V^2}{3.6^2 R} - \frac{g}{S} h; \\ \Psi &= \frac{d\alpha_{ir}}{dt}; \\ f &= \frac{dh}{dt}, \quad i = \frac{dh}{dl} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де V – швидкість руху екіпажу, км/год;

R – радіус кривої, м;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

S – відстань між осями головок рейок, мм;

h – підвищення зовнішньої рейки, мм.

Для лінійного відводу підвищення і кривизни по довжині перехідної кривої, умови (1) можна записати у вигляді

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{ir} &= \frac{V^2}{3.6^2 R} - \frac{g}{S} h; \\ \Psi &= \frac{V^3}{3.6^3 R l} - \frac{g V}{3.6 S l} h; \\ f &= \frac{h V}{l}, \quad i = \frac{h}{l} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де l – довжина перехідної кривої.

Визначенню максимально припустимих значень перерахованих критеріїв присвячена велика кількість досліджень. На залізницях України для пасажирських поїздів із швидкостями руху до 160 км/год згідно з інструкціями [1, 2] прийняте максимальне непогашене прискорення $0,7 \text{ м/с}^2$ при русі по одиночних кривих і $0,4 \text{ м/с}^2$ для сполучених кривих без перехідної кривої; швидкість наростання непогашеного прискорення – $0,6 \text{ м/с}^3$, а для багаторадіусних кривих, спрямованих в одну сторону, і для сполучених кривих без перехідної кривої – $0,3 \text{ м/с}^3$; допустима швидкість підйому колеса по відводу підвищення – $28...35 \text{ мм/с}$.

Значення прискорень, розраховані за наведеними загальновідомими формулами, істотно відрізняються від виміряних експериментально під час дослідних поїздок. Це пояснюється набагато більшою складністю системи «вагон», у порівнянні з спрощеним представленням екіпажу як «матеріальна точка», а також показує недостатність квазістатичних критеріїв для характеристики динамічної системи [3]. Проілюструємо це на прикладі. На рис. 1. показано геометрію кривої ділянки (графік стріл і підвищень зовнішньої рейки). Стріли вимірювалися від середини хорди довжиною 20 м із кроком 10 м. На цій кривій були проведені експериментальні поїздки пасажирського вагону, що був обладнаний для проведення вимірів. Отримані графіки горизонтальних прискорень для швидкостей руху 110 і 160 км/год, що вимірювались на передньому по ходу руху візку пасажирського вагона, та розраховані за формулами (2) для точок, у яких вимірювалися стріли й підвищення зовнішньої рейки.

При порівнянні експериментальних і теоретичних результатів було встановлено, що горизонтальні прискорення при русі в кривій носять коливальний характер з піковими значеннями, які мають значну амплітуду; амплітуда коливань і різниця між динамічними (виміряними експериментально) і статичними прискореннями зростає із збільшенням швидкості руху.

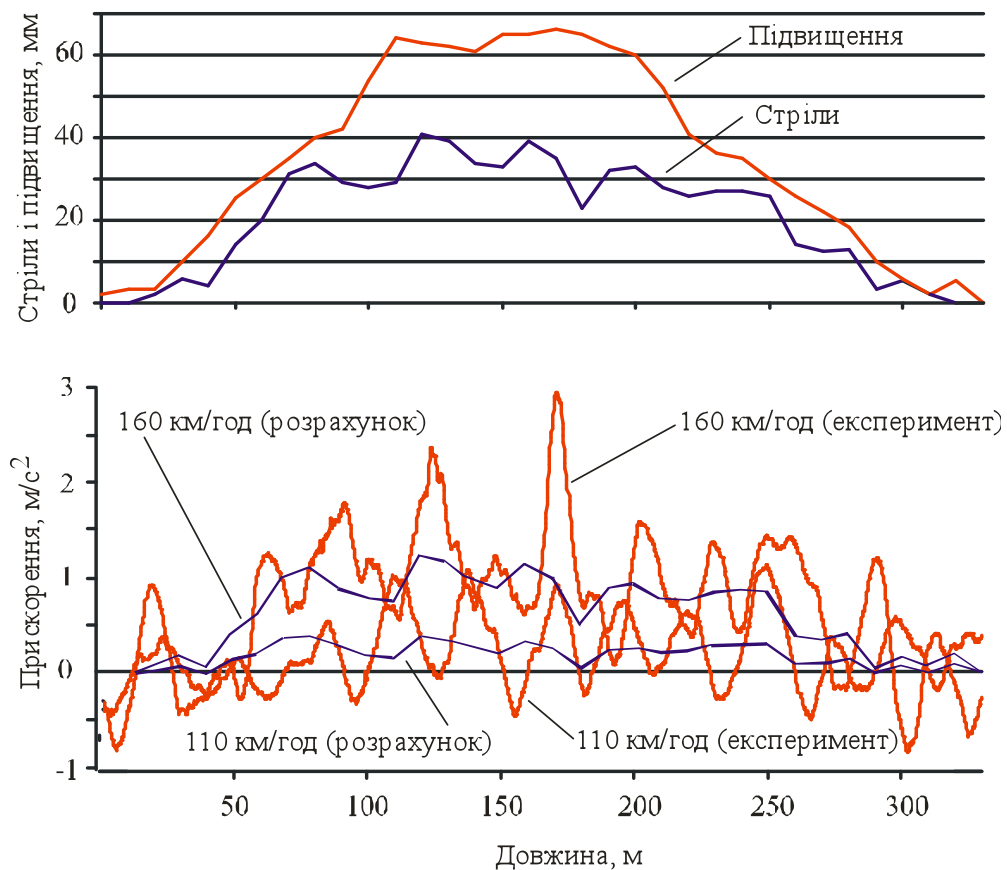


Рис. 1. Горизонтальні прискорення на кривій реального обрису

Ще проф. О. П. Єршков відзначав, що критерії допустимих значень α і Ψ є досить узагальненими характеристиками, дійсними для випадків, коли розглядається екіпаж як матеріальна точка або відрізок. Фактично реальні одиниці рухомого состава являють собою системи, які при русі по колії коливаються, мають сили інерції тощо [4]. У деяких роботах відзначається, що при визначенні швидкості, що допускається при русі в кривих, потрібно також урахувувати імпульсні прискорення, величина яких повинна бути обмежена до $2 \dots 2.5 \text{ м/с}^2$.

У багатьох наукових працях дія прискорення розглядається як коливальний процес, амплітуда якого нормується залежно від частоти коливань. Так, низькочастотні прискорення, що зустрічаються рідко, можуть мати більшу амплітуду, а прискорення із частотою порядку $4 \dots 7 \text{ Гц}$ повинні обмежуватися сильніше, тому що людина фізіологічно більше сприйнятлива до коливань такої частоти [5], рис. 2.

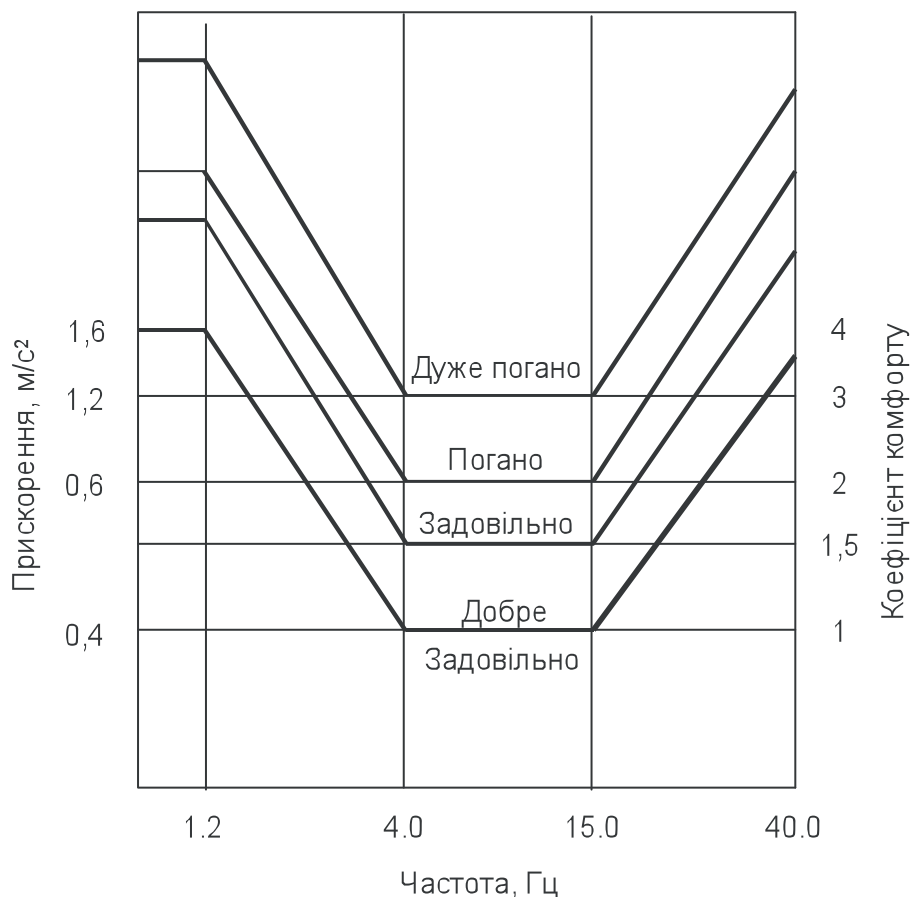


Рис. 2. Оцінка руху за горизонтальними прискореннями

Коливальний характер прискорень, що діють на пасажирів, як у горизонтальній, так і у вертикальній площинах, впливає на комфортабельність їзди, стомлюваність і самопочуття людей. Особливо це важливо при високих швидкостях руху, для яких амплітуда коливань збільшується.

Істотну складність у рішенні даного питання становить нормування параметрів коливального процесу. Основним критерієм у встановленні таких норм на ділянках швидкісного руху повинна служити комфортабельність їзди пасажирів. На сьогоднішній день в Україні тільки починається використання нормативів такого характеру, розрахованих на практичне застосування.

Також існує методика по визначенню комфортабельності їзди пасажирів, рекомендована до використання ОСЗ – Пам'ятка 513 «Керівні принципи для оцінки комфортності пасажирів від вібрації в залізничних засобах пересування» [5]. Рекомендації цієї Пам'ятки в тому чи іншому вигляді застосовуються в більшості Європейських країн та в Україні при розробці другої частини інструкції ЦП-0269 для прискореного руху [1].

З огляду на різні цілі й завдання дослідження, застосовуються спрощений і повний методи оцінки комфортабельності їзди. При спрощеному методі комфорт пасажирів визначається приблизно від прискорень, що діють на рівні підлоги вагона. У повному методі використовуються прискорення, що діють на рівні підлоги, сидіння й спини

на сидячу людину. При цьому ураховуються прискорення, що діють у всіх трьох напрямках – горизонтальне, вертикального й поздовжнє. Для кожного напрямку враховуються вагові коефіцієнти, що залежать від частоти коливань. Довжина спектра обмірюваних прискорень становить 5 секунд. Це дозволяє враховувати найбільш низькі частоти й уможлиблює одержати мінливість у часі значень прискорень. Виміри повторюються п'ять разів для подальших статистичних обчислень. Тривалість вимірів залежить від мети випробувань, але так чи інакше, повинна бути кратна п'яти. Результатом статистичної обробки є прискорення із імовірністю 50% і 95%: a_{50} і a_{95} .

Для розрахунку коефіцієнта пасажирського комфорту приводяться дві формули

$$N = 4a_{ZP95} + 2\sqrt{a_{Y95}^2 + a_{Z95}^2} + 4a_{X95}, \quad (3)$$

і більш розширена

$$N = 3\sqrt{16a_{XP50}^2 + 4a_{YP50}^2 + a_{ZP50}^2} + 5a_{Y95}, \quad (4)$$

де a – амплітуда прискорення з урахуванням вагового коефіцієнта, що враховує частоту коливань:

1-й індекс указує напрямок прискорення;

2-й індекс – місце дії прискорення: P – підлога, D – рівень сидіння, A – рівень спинки сидіння;

3-й індекс – імовірність значення прискорення за даними статистичної обробки.

Коефіцієнт комфорту пасажирів оцінюється по шкалі, наведеній в табл. 1.

Таблиця 1 – Оцінка комфортності пасажирів за коефіцієнтом N

Значення коефіцієнта N	Характеристика комфорту пасажирів
$N < 1$	дуже гарний
$1 < N < 2$	гарний комфорт
$2 < N < 4$	помірний комфорт
$4 < N < 5$	бідний комфорт
$N > 5$	дуже бідний комфорт

Залежно від категорії поїзда рекомендуються наступні значення: приміський поїзд $N=4$; звичайний рухомий склад $N=3$; рухомий склад люкс $N=2$.

2. Визначення положення колії в плані машинним методом

Для отримання достовірних результатів розрахунків перш за все необхідні вихідні дані відповідної точності. Оцінка положення колії в плані може виконуватись різноманітними приладами з використанням різних методів зйомки. В сучасних колійних машинах такі вимірювання базуються на визначенні різниці кривизни в суміжних точках, яка вимірюється по стрілі вигину щодо хорди, утвореної крайнім датчиком виміру шаблону і переднім

ходовим візком. На рис. 3 показана схема положення колії в плані, що використовується колієвимірвальними вагонами.

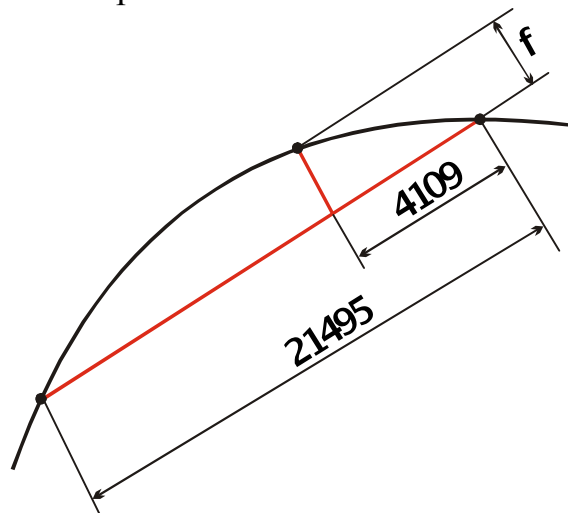


Рис. 3. Схема виміру положення колії в плані колієвимірвальним вагоном

Знаходження положення кривій по запису значень стріл полягає в визначенні координат (або кривизни) кожної точки кривої. При цьому виникає низка розрахункових складнощів.

Перше зауваження. При визначенні кривизни в точці «С» (рис. 4) приймається, що дуга AB має постійну кривизну, потім при розгляді точки B – кривизна дуги CD постійна. Як наслідок, і кривизна дуги CB повинна бути постійною, але в точках C і B кривизна різна (якщо $f_1 \neq f_2$). Таким чином, усереднюється кривизна на ділянці, рівній довжині хорди – «а», а потім, її значення поширюється на ділянку довжиною «а/2».

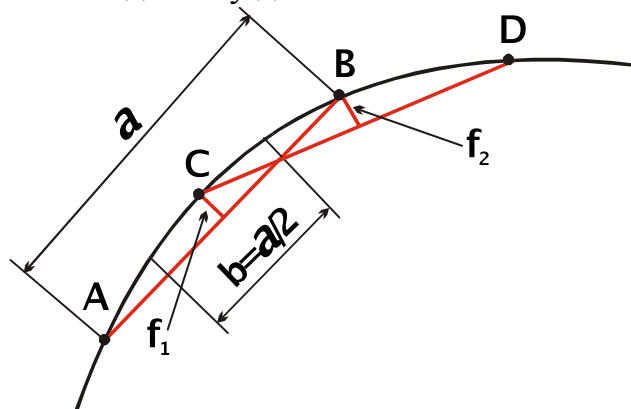


Рис. 4. Послідовність розрахунку кривизни в точках кривої за методом стріл (кривизна в межах хорди приймається постійною)

Друге зауваження. При розрахунку координати точки «3» (рис. 5) потрібно мати відомі координати точок «1» і «2». Для цього необхідно, по-перше, починати розрахунок із прямої ділянки (з нульових координат точок «1» і «2»); по-друге, помилка в розрахунку однієї точки поширюється на всі наступні, у такий спосіб вона накопичується по довжині кривої; по-третє, якщо стріла вимірюється не від середини хорди, то при визначенні її

наступного положення (після переміщення на крок ds) координати точок «1» і «2» є невідомі і можуть бути отримані тільки інтерполяцією.

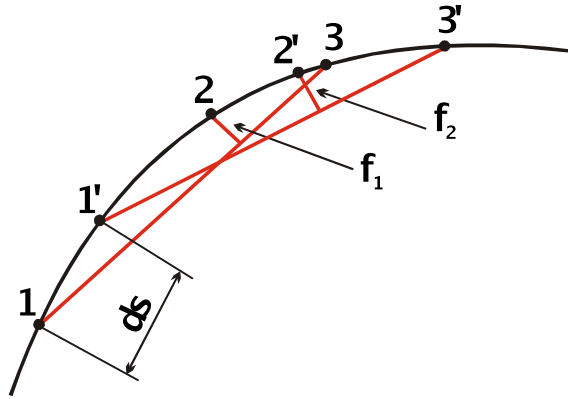


Рис. 5. Послідовність розрахунку кривизни в точках кривій за методом стріл (координата наступної точки залежить від точності попередніх)

Третє зауваження. Розглянемо рух хорди по окремій геометрично незалежній, замкнутій, одноманітній нерівності. Отриманий запис не буде точно співпадати з обрисом нерівності на колії – відображення нерівності буде істотно залежати від співвідношення її довжини та довжин пліч хорди, рис. 6.

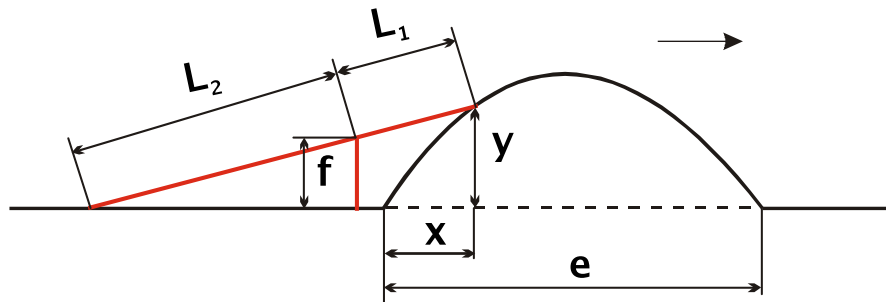


Рис. 6. Проходження нерівності колії вимірювальною хордою

У загальному виді функцію значення стріли можна записати у вигляді

$$f(x) = y(x) - y(x + L_1) \frac{L_2}{L_1 + L_2} - y(x - L_2) \frac{L_1}{L_1 + L_2}. \quad (5)$$

Для хорди з несиметричним виміром стріли може бути чотири варіанта співвідношення розмірів, які по різному впливають на результати [6]. Для варіанту $e > L_1$, $e > L_2$, $e < L_1 + L_2$ приклад відображення нерівності на стрічці колієвимірювального вагону показано на рис. 7.

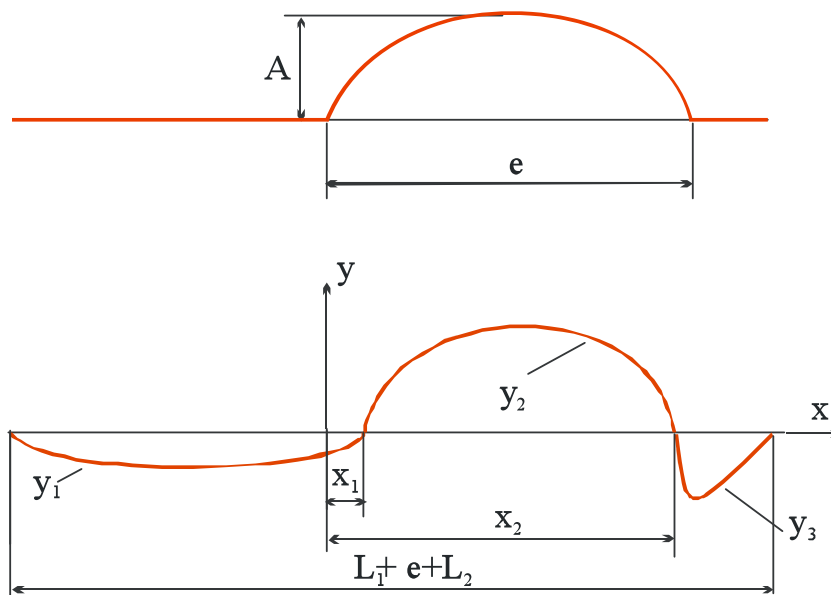


Рис. 6. Приклад запису нерівності колії в плані на стрічці колієвимірювального вагону для випадку $e > L_1$, $e > L_2$, $e < L_1 + L_2$

Перетворивши формулу (5), можна одержати залежність значення радіуса від стріли для геометрично правильної кругової кривої

$$R = \frac{L_1 L_2}{2f}. \quad (6)$$

3. Оцінка стану та геометричного положення колії машиною ВПР-02

Сучасні машини для виправки і рихтування колії використовують механізми виміру положення колії в плані тотожні до схеми, наведеної на рис. 3. Так на рис. 7 показана схема вимірювального пристрою для машини ВПР-02.

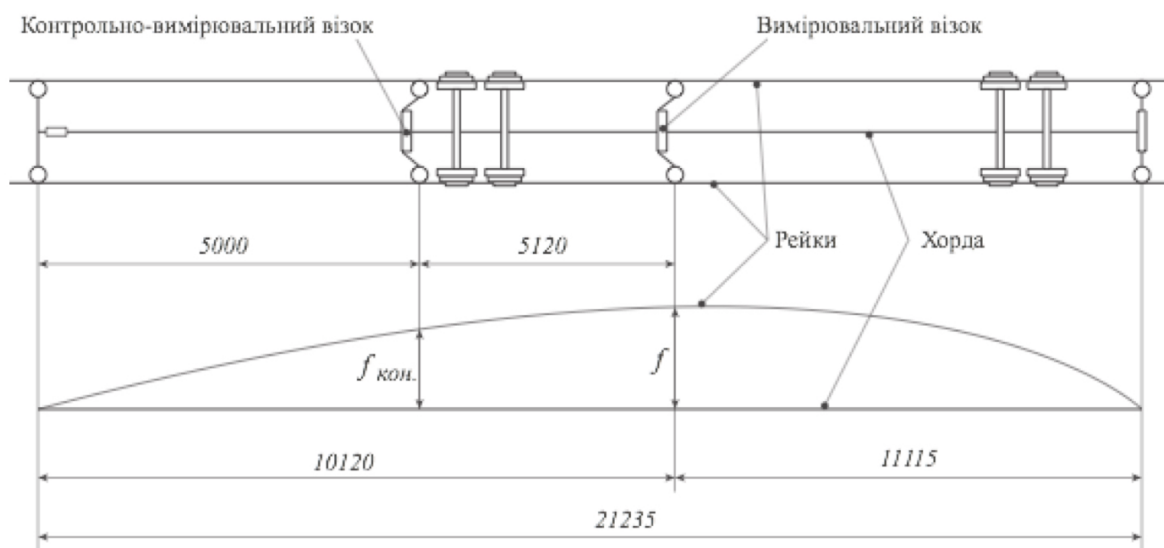


Рис. 6. Схема вимірювального приладу машини ВПР-02

На сьогодні Укрзалізницею розпочато процес ремонту та технічного переоснащення машин системи ВПР-02. Серед іншого на машини

встановлюється система «Стріла», яка базується на комп'ютерному комплексі «RWPlan» (розрахунки для реконструкції і виправки колії в плані) – розробка кафедри «Проектування та будівництво доріг» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна під керівництвом доц. І. П. Корженевича. На рис. 7...9 показана машина ВПР-02 під час налаштування системи «Стріла», підбивний механізм та робоче місце оператора.



Рис. 7. Машина ВПР-02 під час налаштування системи «Стріла»

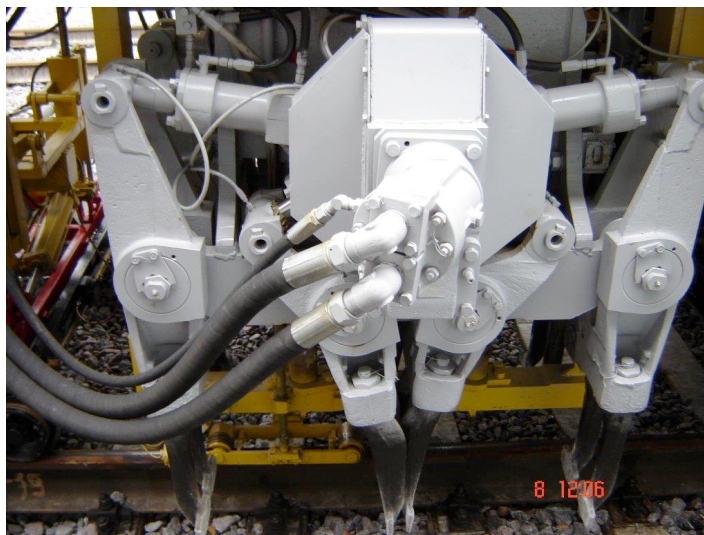


Рис. 8. Підбивний блок машини ВПР-02



Рис. 9. Робоче місце оператора системи «Стріла»

Використання сучасного комп'ютерного обладнання дозволило, по-перше, застосувати математичні алгоритми, які охоплюють вирішення зазначених вище задач, по-друге, швидко і якісно виконувати як оцінку стану колії, так і її виправку в горизонтальній і вертикальній площинах з урахуванням параметрів даної ділянки та встановлених умов експлуатації [7].

Висновки

Існуючі методи розрахунку допустимої швидкості за характеристиками плану повинні корегуватися для урахування динамічних явищ, що набирають важливості при зростанні швидкостей руху. Визначення реального положення колії, навіть з використанням сучасних колійних машин, є складною математичною задачею, яка може бути вирішена тільки в заданому діапазоні точності. Машинна зйомка з використанням автоматизованої системи типу «Стріла+RWPlan» (ДПТ, Україна) поряд із збільшенням швидкості і спрощенням технологічного процесу виконання робіт забезпечує при дотриманні певних умов необхідної точності зйомки й виправки положення залізничної колії.

Література

1. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України ЦП-0269/ Наказ Мін. ін-фраструкт. України від 01 березня 2012 р. № 072-Ц. – К. : Мін. інфраструктури України, Укрзалізниця. – 2012. – 456 с.
2. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії : ЦП-0236 : затв. наказом Укрзалізниці від 14.12.2010 р. №778-Ц / М. Б. Курган, А. М. Орловський, О. М. Патласов и др. – К., 2010. – 52 с.
3. Курган Н. Б. Критерии определения допускаемой скорости движения в кривых //Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2003. – №. 2. – С. 127-132.

4. Сопряжения кривых и особенности движения подвижного состава по ним / Под ред. О. П. Ершкова. Труды ЦНИИ МПС. Вып. 500. – М.: Транспорт, 1973. – 96 с.
5. UIC Code 513 R. Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles. Paris, Int. Union of Railways Publ., 1995. 81 p.
6. Курган М. Б., Курган Д. М., Лужицкий О. Ф. Дослідження нерівностей колії в межах залізничних переїздів // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – № 5(59). – С. 84-96.
7. Гаврилов М. А., Лужицкий О. Ф. Обеспечение точности съемки кривых при механизации путевых работ // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. – Хабаровск, 2015. – Вып. 3. – С. 110-119.