

УДК 656.2

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.145.2014.80971>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ З ПОЗИЦІЙ ТЕОРІЇ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

Канд. техн. наук А.В. Прохорченко,  
магістр В.Г. Петренко

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Канд. техн. наук А.В. Прохорченко,  
магистр В.Г. Петренко

## INVESTIGATION OF RAILWAY INFRASTRUCTURE CAPACITY FROM THE STANDPOINT OF THE THEORY OF TRAFFIC FLOW

Ph.D., Associate Professor A. Prokhorchenko  
Master V. Petrenko

*У роботі проведено аналіз останніх наукових досягнень у сфері теорії транспортних потоків. Проведено експериментальні дослідження щодо підтвердження справедливості теорії трьох фаз Кернера в умовах руху поїздопотоків на ділянці Колосівка – Одеса-Сортувальна. Здійснено порівняльний аналіз наявної пропускної спроможності на ділянці з показниками нормативного графіка руху поїздів і реальними середніми даними прямування поїздів через ділянку. Підтверджено необхідність удосконалення існуючої методики визначення наявної пропускної спроможності на залізницях України.*

**Ключові слова:** пропускна спроможність, ділянка, поїздопотік, залізнична інфраструктура, теорія трьох фаз Кернера.

*В работе проведен анализ последних научных достижений в области теории транспортных потоков. Проведены экспериментальные исследования по подтверждению справедливости теории трех фаз Кернера в условиях движения поездопотоков на участке Колосовка – Одесса-Сортировочная. Осуществлен сравнительный анализ наличной пропускной способности на участке с показателями нормативного графика движения поездов и реальными средними данными следования поездов через участок. Подтверждена необходимость усовершенствования существующей методики определения имеющейся пропускной способности на железных дорогах Украины.*

**Ключевые слова:** пропускная способность, участок, поездопоток, железнодорожная инфраструктура, теория трех фаз Кернера.

*The paper analyzed the latest scientific advances in the theory of traffic flow . The analysis of the shortcomings of the current methods of calculating the available capacity on the railways of Ukraine from the standpoint of analyzing the spatial temporal dynamics flow trains railway line. A revised approach to the analysis of the maximum capacity of the railway station on the theory of three phases Kerner . Experimental study on the verification of the theory of justice three phases Kerner in traffic on the site flow trains Kolosivka–Odessa - Sort. The comparative analysis of available bandwidth on an area of regulatory indicators train schedule and actual average data follow through trains station. We prove a significant difference between the theoretical and the practical maximum capacity of the railway station, which confirms the need to develop methods and software to develop objective methods for determining the capacity of the site. The complex previously conducted studies allow targeted approach to developing models of analysis bandwidth usage and station areas as a whole and adjust the direction flow trains using information about their current situation and provide forecasting changes in operational work in real time.*

**Keywords:** Capacity; Section; Flow trains; Railway infrastructure; The theory of three phases Kerner.

**Вступ та актуальність теми.** Для вирішення завдання підвищення ефективності функціонування залізничної мережі України потребують теоретичного обґрунтування підходи щодо встановлення технічних і технологічних обмежень інфраструктури залізничних напрямків у частині пропускання поїздопотоків. Існуюча методика розрахунку наявної пропускної спроможності дільниць і напрямків залізниць [1] орієнтована, в основному, на можливості інфраструктури і при цьому не повною мірою враховує особливості і характерні властивості поїздопотоків на всій протяжності дільниць. Діюча методика розрахунку пропускної спроможності ґрунтується на розрахунках для обмежуючого перегону (у розрізі), тоді як реально реалізована (практична) пропускна спроможність змінюється та залежить від характеристик потоку поїздів, що прямують по всій дільниці. На умови прямування поїздів у потоці впливає велика кількість факторів: план і профіль колії, технічне оснащення перегонів і станцій, тягово-експлуатаційні характеристики локомотивів, маса і довжина поїздів різних категорій, допустимі швидкості руху, погоднокліматичні умови, "вікна" для виконання ремонтно-колійних робіт, нерівномірність відправлення вантажних поїздів зі станцій (за готовністю), процеси взаємовпливу між поїздами при збільшенні їх кількості в потоці тощо. Відсутність обліку даних факторів

приводить до невиправданого заниження розрахункового міжпоїзного інтервалу і, як наслідок, до завищення наявної пропускної спроможності [2].

**Постановка задачі.** Для підтвердження недосконалості методики розрахунку наявної пропускної спроможності на залізницях України в роботі було запропоновано використати метод розрахунку на основі параметричних моделей [3, 4, 5], які більш точно дозволяють врахувати фізику транспортного потоку на макрорівні функціонування інфраструктури.

**Вирішення завдання.** Для вирішення завдання щодо аналізу закономірностей в організації руху поїздів важливу роль відіграє фундаментальна діаграма транспортного потоку, що заснована на гідродинамічній аналогії [6, 7]. За таким підходом поїздопотік можна розглядати як безперервне середовище, точніше як одномірну стиснуту рідину. При цьому передбачається наявність однозначної залежності середньої швидкості потоку  $v(\rho)$  від щільності поїздів  $\rho$ . Останнє припущення дозволяє ввести також величину потоку  $q(x, t)$  (кількість поїздів, що перетинають даний розтин дільниці в точці  $x$  за одиницю часу) як певну функцію  $Q(\rho) = v(\rho) \rho$  локальної щільності  $\rho$ . Співвідношення  $q = Q(\rho)$  відіграє важливу роль у теорії транспортних потоків, її відображення на площині  $\{q, \rho\}$  називається фундаментальною діаграмою (рис. 1, а).

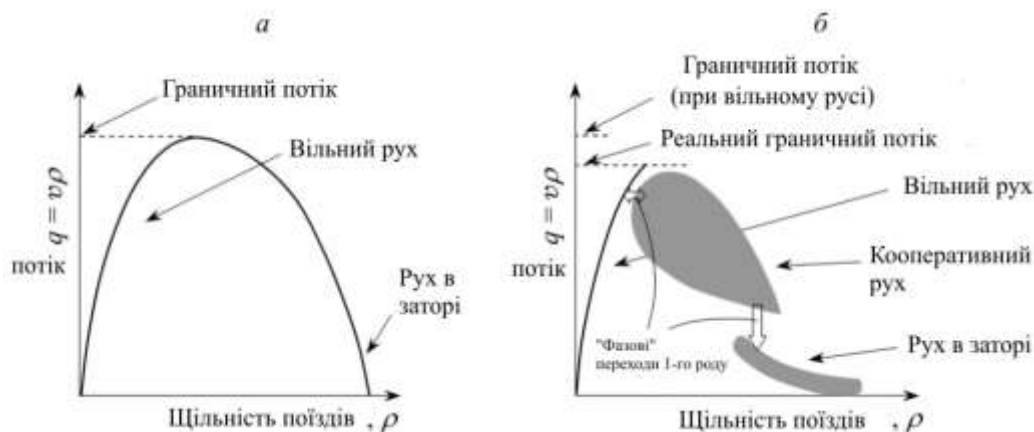


Рис. 1. Фундаментальна діаграма (а) і фазові стани поїздопотоків (б)

Прийняте припущення, що залежність інтенсивності від щільності поїздопотоків є безперервною, надає можливість визначати

практичну пропускну спроможність безпосередньо за щільністю потоку (рис. 1, а). З фундаментальної діаграми випливає, що

одному і тому самому значенню інтенсивності потоку поїздів відповідають різні (як правило, дві) щільності і, як наслідок, різні швидкості. Очевидно, що більш вигідним режимом є режим з більшою швидкістю (див. рис. 1, а): потоки будуть задоволені тією самою кількістю, однак середній час руху знизиться, оскільки рух буде проходити при великих швидкостях (і, як наслідок, з меншими щільностями) [8]. При розробленні графіка руху поїздів важливим є врахування даної залежності, а рух середньостатистичного поїзда повинен відповідати режиму вільного потоку.

Слід зазначити, що, як показали експериментальні дослідження, залежність інтенсивності потоку від щільності,  $q = q(\rho)$  не є неперервною. Зокрема, її максимум має складну структуру, він складається з двох непов'язаних одна з одною віток [8]. У 1996 р. Кернер [9, 11], аналізуючи емпіричні дані, запропонував додати в класичне уявлення про рух потоку або в режимі вільного потоку, або в режимі затору третю проміжну стадію. У результаті вийшла така класифікація фаз руху транспортного потоку (рис. 1, б): вільний рух (англ., free flow, F), синхронізований рух (англ., synchronized flow, S) і рух у заторах (англ., wide moving jams, J). Ці стани потоку поїздів відповідають різним фрагментам основної діаграми, які принципово відрізняються один від одного за спостережуваними властивостями. За Кернером, у транспортних потоках реалізуються три принципові фази, і якщо звичайна рідина може просто текти або замерзнути, то у транспортного потоку є третій, «напівзастиглий» - желеподібний стан. Це синхронізований рух поїздів, коли поїзди заважають один одному розігнатися до встановленої швидкості, але потік не

переходить у стан затору. За даним режимом S поїзди прямують один за одним за показаннями системи інтервального регулювання на жовтий або навіть на червоний сигнал прохідних світлофорів. Практичні дослідження показують, що при прямованні поїзда на жовтий вогонь середня швидкість знижується на 46 %, графікова – на 63 % [2, 14].

При вільному русі, коли дільниця не завантажена, поїзди рухаються зі встановленою швидкістю, вільно переїжджаючи на сусідні блок-дільниці. Кореляції в русі окремих поїздів відсутні, і середня швидкість поїздів визначається тільки середньою відстанню між ними. Коли рух стає досить щільним, поїзди вже не можуть вільно рухатись і змушені погоджувати свою швидкість зі швидкістю потоку. Це і є синхронізована фаза руху поїздів. Іншими словами, у цьому потоці формуються кластери поїздів, які переміщуються по залізничній дільниці як єдине ціле. Як результат, на основній діаграмі (рис. 1, б) виникає двовимірний простір можливих станів поїздопотоку – область сильно розсіяних станів (англ., widely scattered states). Це може свідчити про принципову зміну властивостей руху поїздів у перевантаженому транспортному потоці (англ., congested traffic flow) порівняно з вільним потоком.

Грунтуючись на емпіричних даних вимірювань, Кернер зробив висновок, що існує нескінченна кількість значень пропускної спроможності у вільному потоці [11]. Ця нескінченна кількість значень пропускної спроможності знаходиться в діапазоні між мінімальним  $q_{th}$  і максимальним  $q_{max}$  значеннями пропускної спроможності (рис. 2).

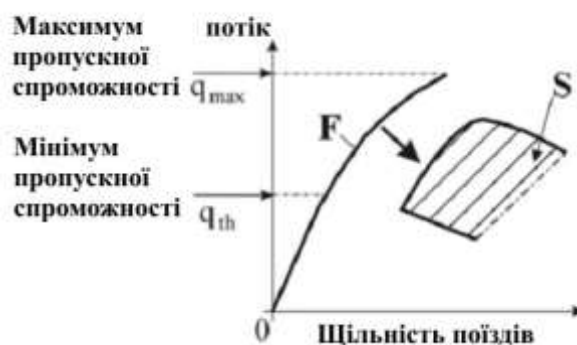


Рис. 2. Максимум і мінімум пропускної спроможності залізничної дільниці в теорії трьох фаз Кернера

Якщо величина потоку близька до максимального значення пропускної спроможності  $q_{\max}$ , то вже досить мале збурення у вільному потоці поблизу вузького місця призведе до спонтанного  $F \rightarrow S$  фазового переходу. З іншого боку, якщо величина потоку близька до мінімального значення пропускної спроможності  $q_{th}$ , то тільки збурення дуже великої амплітуди здатне призвести до спонтанного  $F \rightarrow S$  фазового переходу.

Нескінченна кількість значень пропускної спроможності ділянки поблизу вузького місця може бути пояснено тим, що вільний потік при значеннях величини потоку  $q$  в діапазоні

$$q_{th} \leq q \leq q_{\max} \quad (1)$$

є метастабільним, тобто при малих збуреннях вільний потік зберігається, тоді як при великих збуреннях вільний потік є нестійким.

Нескінченна кількість значень пропускної спроможності поблизу вузького

місця в теорії трьох фаз Кернера фундаментально суперечить класичним теоріям транспортного потоку і методам управління та автоматичного регулювання транспортних потоків, які припускають існування у будь-який момент часу деякої (фіксованою або випадковою) пропускної спроможності.

Перевантажений транспортний потік характеризується так званим широким кластером, що рухається (локальний затор, що рухається). Характеристичні параметри широких рухомих кластерів не залежать від величини потоку і особливостей вузького місця (де і коли кластер виник). Однак характеристичні параметри залежать від погоди, експлуатаційних умов, довжини і маси поїздів і т. п. Швидкість заднього фронту широкого кластера, що рухається  $v_g$  в протилежному потоку напрямку, є характеристичним параметром так само, як і величина вихідного потоку  $q_{out}$  з кластера у разі, коли вільний потік формується після кластера (рис. 3).

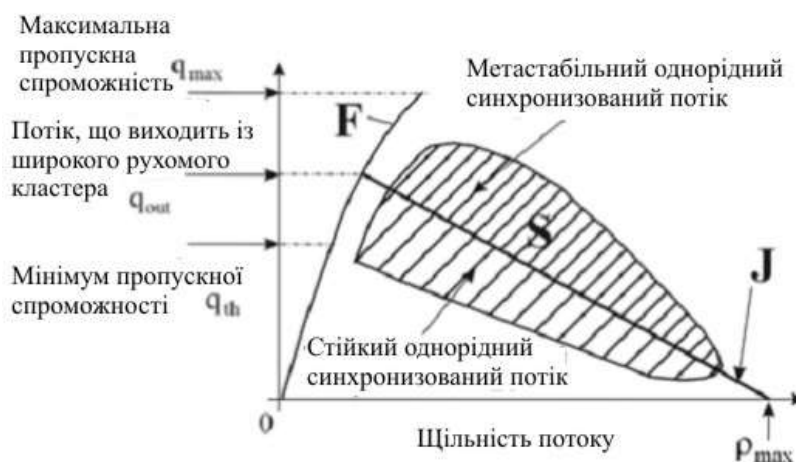


Рис. 3. Три фази транспортного потоку в площині потік-щільність у теорії трьох фаз Кернера

Це означає, що різні широкі рухомі кластери мають однакові параметри при однакових умовах. У результаті дані параметри можуть бути передбачені. Рух заднього фронту широкого рухомого кластера може бути показано на площині потік-щільність за допомогою прямої, названою лінією J Кернера (рис. 3). Нахил лінії J Кернера дорівнює швидкості заднього фронту  $v_g$ , у той час як координата перетину лінії J Кернера з віссю

абсцис (при нульовому потоці) відповідає щільності потоку  $\rho_{\max}$  в широкому рухомому кластері [11].

Кернер підкреслює, що мінімум пропускної спроможності  $q_{th}$  і величина вихідного потоку з широкого рухомого кластера  $q_{out}$  описуються двома якісно різними властивостями вільного транспортного потоку. Мінімум пропускної спроможності

$q_{th}$  характеризує  $F \rightarrow S$  фазовий перехід поблизу вузького місця, тобто виникнення щільного потоку (англ., traffic breakdown). У свою чергу величина вихідного потоку з широкого рухомого кластера  $q_{out}$  характеризує  $J$ . Залежно від зовнішніх умов, а також від характеристик вузького місця, поблизу якого можливий  $F \rightarrow S$  фазовий перехід, мінімум пропускної спроможності  $q_{th}$  може бути як менше (рис. 3), так і більше, ніж величина вихідного потоку  $q_{out}$ .

Для підтвердження теорії трьох фаз Кернера в умовах руху поїздопотоків на дільниці Колосівка – Одеса-Сортувальна запропоновано провести експериментальні дослідження залежності інтенсивності поїздопотоків від його щільності,  $q = q(\rho)$ . Крім того, у роботі запропоновано порівняти визначену наявну пропускну спроможність на дільниці  $N_{наявн}$  з реальними даними максимальної кількості пропущених поїздів через дільницю та нормативами обсягів перевезень за графіком руху поїздів  $N_{грп}$  (рис. 4).

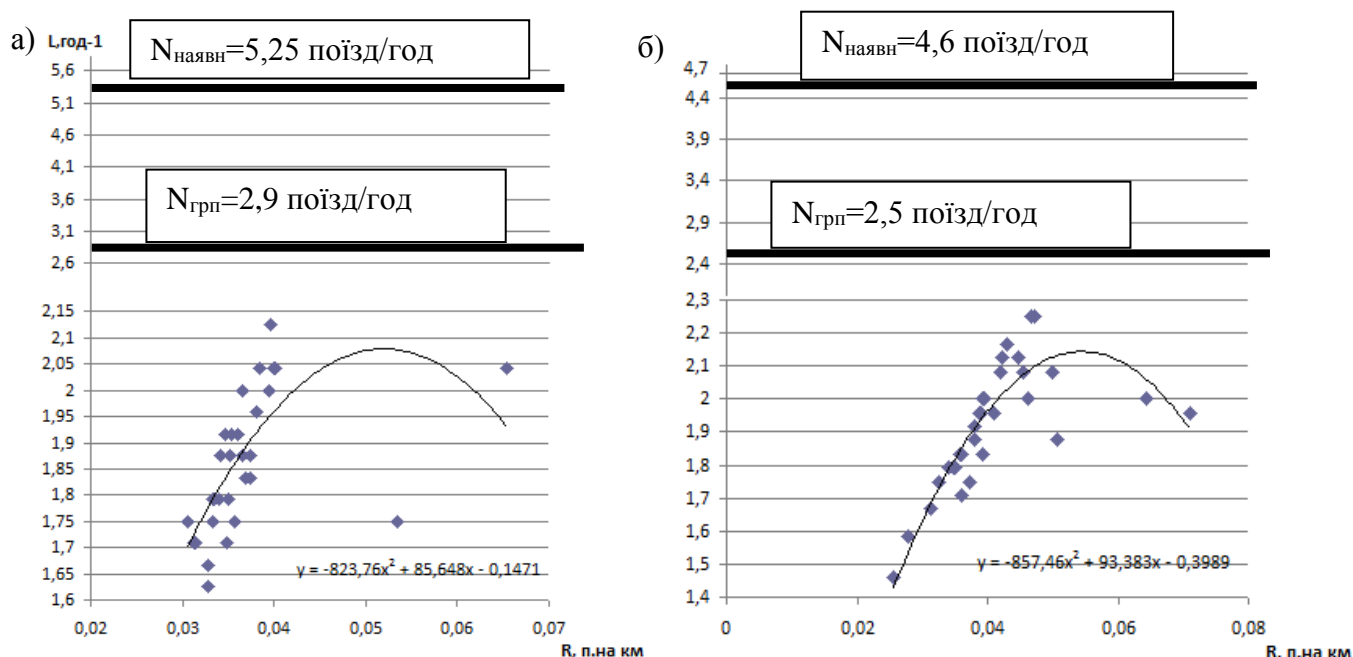


Рис. 4. Залежність інтенсивності поїздопотоків від його щільності на дільниці Колосівка – Одеса-Сортувальна та порівняння значень наявної пропускної спроможності на дільниці  $N_{наявн}$  і нормативів обсягів перевезень за графіком руху поїздів  $N_{грп}$ : а – у парному напрямку; б – у непарному напрямку

Згідно з рис. 4 отримані залежності підтверджують справедливості теореми трьох фаз Кернера та можуть з усередненими показниками бути апроксимовані поліномом другого порядку. Відповідно до реальних даних (рис. 4, а) для поїздо-дільниці Одеса-Сортувальна – Колосівка в парному напрямку максимальне значення інтенсивності складає  $2,13 \text{ год}^{-1}$ , що відповідає добовим розмірам

руху 51 поїзда. Тоді як середнє значення максимальної інтенсивності, що знайдена при апроксимації реальних даних поліномом другого порядку, складає  $2,05 \text{ год}^{-1}$ , що відповідає добовим розмірам руху 49 поїздів. За тим самим варіантом було розраховано наявну пропускну спроможність дільниці Одеса-Сортувальна – Колосівка:

$$n_{\text{ван}} = n_{\text{н}} - \varepsilon_{\text{пс}} * n_{\text{пс}} - \varepsilon_{\text{пр}} * n_{\text{пр}} - (\varepsilon_{\text{зб}} - 1) * n_{\text{зб}} = 154 - 1,85 * 7 - 2,25 * 6 - (3 - 1) * 1 = 126 \text{ поїздів}, \quad (2)$$

де  $n_H$  – наявна пропускна спроможність дільниці при паралельному графіку;

$\epsilon_{пс}, \epsilon_{пр}, \epsilon_{зб}$  – коефіцієнти зняття відповідно для пасажирських, приміських і збірних поїздів;

$n_H, n_{пс}, n_{пр}$  – кількість поїздів (пар поїздів) різних категорій.

Різниця значень наявної пропускної спроможності та нормативної кількості поїздів за графіком руху поїздів (ГРП) складає  $N_{нев}=126-70=56$  поїздів, що відповідає рівню використання пропускної спроможності 56,6 % наявної пропускної спроможності (при порівнянні наявної пропускної спроможності з реальними середніми даними  $N_{нев}=126-49=77$  поїздів, що відповідає рівню використання пропускної спроможності 38,8 % наявної). Такі значення дуже суперечливі, оскільки при реальних параметрах руху поїздопотоку при  $N_{реал}=49$  поїздів щільність потоку на дільниці відповідає області сильно розсіяних станів, тобто при збільшенні щільності інтенсивність знижується. За таких умов при реальному пропусканні 126 поїздів, що відповідає щільності дільниці  $R_{126}=0,106$  поїзд/км, модельне значення інтенсивності, яка

визначена за знайденим поліномом другого порядку, складає  $L_{126}=0,1801 \text{ год}^{-1}$ , тобто рух поїздів на дільниці не можливий (затор). У випадку пропускання кількості поїздів відповідно до нормативного ГРП  $N_{грп}=70$  поїздів, що відповідає  $R_{70}=0,058789$  поїзд/км, за розрахунками  $L_{70}=2,041 \text{ год}^{-1}$ , що відповідає області нормально реалізованих максимальних значень обсягів перевезень на розрахунковій дільниці.

Так само проведено порівняльний аналіз на дільниці Колосівка – Одеса-Сортувальна в непарному напрямку руху поїздів. Відповідно до реальних даних (рис. 4, б) для розрахункової поїздо-дільниці в непарному напрямку максимальне значення інтенсивності складає  $2,25 \text{ год}^{-1}$ , що відповідає добовим розмірам руху 54 поїздів, тоді як середнє значення максимальної інтенсивності, що знайдена при апроксимації реальних даних поліномом другого порядку, складає  $1,91 \text{ год}^{-1}$ , що відповідає добовим розмірам руху 50 поїздів. За тим самим варіантом було розраховано наявну пропускну спроможність дільниці Колосівка – Одеса-Сортувальна:

$$\begin{aligned} n_{\text{ван}} &= n_H - \epsilon_{пс} * n_{пс} - \epsilon_{пр} * n_{пр} - (\epsilon_{зб} - 1) * n_{зб} = \\ &= 1154 - 1,98 * 8 - 4,75 * 6 - (1,3 - 1) * 1 = 110, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $n_H$  – наявна пропускна спроможність дільниці при паралельному графіку;

$\epsilon_{пс}, \epsilon_{пр}, \epsilon_{зб}$  – коефіцієнти зняття відповідно для пасажирських, приміських і збірних поїздів;

$n_H, n_{пс}, n_{пр}$  – кількість поїздів (пар поїздів) різних категорій.

Різниця значень наявної пропускної спроможності та нормативного значення поїздопотоку за графіком руху поїздів (ГРП) складає  $N_{нев}=110-60=50$  поїздів, що відповідає рівню використання пропускної спроможності 45,45 % наявної пропускної спроможності (при порівнянні наявної пропускної спроможності з реальними середніми даними  $N_{нев}=110-50=60$  поїздів, що відповідає рівню використання пропускної спроможності 54,55 % наявної).

Такі значення дуже суперечливі, оскільки при реальних параметрах руху поїздопотоку при  $N_{реал}=50$  поїздів щільність потоку на дільниці відповідає області сильно розсіяних станів, тобто при збільшенні щільності інтенсивність знижується. За таких умов при реальному пропусканні 110 поїздів, що відповідає щільності дільниці  $R_{110}=0,0965$  поїзд/км, модельне значення інтенсивності, яка визначена за знайденим поліномом другого порядку, складає  $L_{110}=0,461 \text{ год}^{-1}$ , тобто рух поїздів на дільниці не можливий (затор). У випадку пропускання кількості поїздів відповідно до нормативного ГРП  $N_{грп}=60$  поїздів, що відповідає  $R_{60}=0,0526$  поїзд/км, за розрахунками  $L_{60}=2,0914 \text{ год}^{-1}$ , що відповідає області нормально реалізуємих максимальних значень обсягів перевезень на розрахунковій дільниці.

**Висновки.** Аналіз останніх наукових досягнень у сфері теорії транспортних потоків підтверджує необхідність перегляду існуючих методик визначення пропускної спроможності залізничних дільниць і напрямків у цілому. Проведені експериментальні дослідження в умовах дільниць Колосівка – Одеса-Сортувальна довели справедливості теореми трьох фаз Кернера для поїздопотоків на дільниці. Проведення розрахунків за діючою методикою визначення наявної пропускної спроможності призводить до суттєвого завищення значень пропускної спроможності, що в умовах інтенсивної експлуатації дільниць і напрямків веде до їх перевантаження, тобто зниження дільничної швидкості і, як наслідок, до невиконання строків доставки

вантажів, і в деяких випадках до неможливості реалізації заданих обсягів перевезень. Недоліками існуючих підходів до визначення пропускної спроможності є неможливість обліку “вікон” для ремонту і модернізації інфраструктури (крім технологічних), тимчасових обмежень швидкості, довжини і маси поїздів, і найголовніше - це невраховані процеси взаємовпливу між поїздами при збільшенні їх у потоці.

Відмінність планових показників від спостережуваних у реальній експлуатації підтверджує необхідність розроблення технології і програмних засобів для вироблення об'єктивних методів визначення пропускних спроможностей дільниць залізниць, визначених параметрами, пов'язаними з рухом поїздів.

### Список використаних джерел

1. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України, затверджена наказом Укрзалізниця від 14 березня 2001 р. № 143/Ц (ЦД-0036) [Текст]. – К.: Транспорт України, 2001. – 159 с.
2. Левин, Д.Ю. Оптимизация потоков поездов [Текст] / Д.Ю. Левин. – М.: Транспорт, 1988. – 175 с.
3. Lai, Yung-Cheng Enhanced Parametric Railway Capacity Evaluation Tool / Yung-Cheng (Rex) Lai, Christopher P.L. Barkan// Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009. – №2117. – P. 33-40.
4. Krueger, H. Parametric Modeling in Rail Capacity Planning, Proceedings of Winter Simulation Conference, Phoenix, AZ, 1999.
5. Бланк, М.Л. Точный анализ динамических систем, возникающих в моделировании транспортных потоков [Текст] / М.Л. Бланк // Успехи математических наук. – 2000. – Т. 55. – № 3(333). – С. 167-168.
6. Daganzo C.F. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory // Transportation Research — 1994. –V. 28, N. 4. – P. 269-287.
7. Куржанский, А.Б. Роль макро моделирования в активном управлении транспортной сетью [Текст] / А.Б. Куржанский, А.А. Куржанский, П. Варайя // Труды МФТИ. – 2010. – Т. 2. – № 4. – С.73-81.
8. Кленов, А.С. Теория Кернера трех фаз в транспортном потоке - новый теоретический базис для интеллектуальных транспортных технологий [Текст]// А.С. Кленов // Труды МФТИ. — 2010. – Т. 2. – № 4. – С. 75-89.
9. Kerner, B.S. Experimental features of self-organization in traffic flow // Physical Review Letters. — 1998. — V. 81, N. 17.
10. Orosz G., Wilson R.E., Szalai R., Stepan G. Exciting traffic jams: Nonlinear phenomena behind traffic jam formation on highways // Physical Review, E. — 2009. — V. 80, N. 4.
11. Kerner, B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. – Berlin: Springer, 2009. – 278 p.
12. Левин, Д.Ю. Диспетчерские центры и технология управления перевозочным процессом [Текст]: учеб. пособие / Д.Ю. Левин. – М.: Маршрут, 2005. – 760 с.
13. Макарошкин, А.М. Использование и развитие пропускной способности железных дорог [Текст] / А.М. Макарошкин, Ю.В. Дьяков. – М.: Транспорт, 1981. – 287 с.

14. Shvetsov V., Helbing D. Macroscopic dynamics of multilane traffic // Phys. Rev. E. 1999. Vol. 59. P. 6328-6339.

Рецензент д-р техн. наук, професор Т.В. Бутько

---

Прохорченко Андрій Володимирович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-88. E-mail: railwayhub@yandex.ua.

Петренко Вадим Григорійович, магістр, Українська державна академія залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-88. E-mail: vado.net@bk.ru.

Andrii Prokhorchenko Ph.D., Associate Professor, Department of Management of operational work, Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-88. E-mail: railwayhub@yandex.ua.

Vadim Petrenko master, Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-88. E-mail: vado.net@bk.ru.