

УДК 656.2

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ
ЗАЛІЗНИЧНИХ ДІЛЬНИЦЬ**

К-т техн. наук А.В. Прохорченко, магістр В. А. Огієнко

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЧАСТКОВ**

К-т техн. наук А.В. Прохорченко, магистр В. А. Огиенко

**ANALYSIS OF THE METHODS OF CALCULATING THE CAPACITY OF THE
RAILWAY LINES**

Ph.D. Associate Professor A. V. Prokhorchenko, master V. A. Ohienko

В роботі проведено аналіз методів визначення пропускної спроможності залізничних дільниць і напрямків на залізницях світу. Виявлені недоліки і переваги різних методів розрахунку пропускної спроможності. Детально розглянуто рекомендовану Міжнародним союзом залізниць процедуру розрахунку практичної пропускної спроможності на основі методу оптимізації. Доведено ефективність застосування інтегрованої методології до

розрахунку пропускної спроможності на основі послідовного використання аналітичних, оптимізаційних та імітаційних методів.

Ключові слова: пропускна спроможність, транспортна система, залізнична інфраструктура, графік руху поїздів.

В работе проведен анализ методов определения пропускной способности железнодорожных участков и направлений на железных дорогах мира. Выявленные недостатки и преимущества различных методов расчета пропускной способности. Подробно рассмотрено рекомендованную Международным союзом железных дорог процедуру расчета практической пропускной способности на основе метода оптимизации. Доказана эффективность применения интегрированной методологии для расчета пропускной способности на основе последовательного использования аналитических, оптимизационных и имитационных методов.

Ключевые слова: пропускная способность, транспортная система, железнодорожная инфраструктура, график движения поездов.

In this paper, the analysis methods for determining the capacity of railway stations and rail lines in the world. Identified advantages and disadvantages of different methods of calculating capacity. Analytical methods are simple to calculate and is usually used to estimate the theoretical (available) capacity, but it does not account for the stochastic nature of trains and the impossibility of keeping characteristics of the movement trains. Simulation methods to describe the random nature of the traffic dynamics. The disadvantage of this approach is the complexity of practical accessories developed a simulation model of the existing railway infrastructure and time-consuming. According to studies, it was concluded that the optimization method recommended standard UIC 406 R provides a higher accuracy of the solution and is most common in the EU. The efficiency of the use of an integrated methodology for calculating capacity based on consistent use of analytical, simulation and optimization techniques.

Keywords: capacity, transport system, rail infrastructure, train schedule.

Вступ. Задачі модернізації, інноваційного розвитку, інтеграції економіки України у сучасних умовах диктують наявну необхідність детальнішого та як найточнішого визначення пропускної спроможності залізничної транспортної системи. Без встановлення оптимальної пропускної спроможності на залізничній мережі неможливо досягнути покращення використання транспортного, виробничого, соціального, ресурсного потенціалу країни, а отже ефективного обслуговування потреб як підприємств, населення, так і економіки в цілому. Отже, точна оцінка пропускної спроможності залізничних дільниць і напрямків є фундаментальною основою для вирішення найважливіших експлуатаційних задач при організації перевезень.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Діючий на залізницях України аналітичний спосіб визначення пропускної спроможності залізничних дільниць і напрямків не дозволяє визначити реально можливу пропускну спроможність при заданому рівні якості послуг. За таких умов необхідно

провести аналіз світового досвіду розрахунку пропускної спроможності на залізничних дільницях для встановлення раціональних параметрів функціонування інфраструктури залізничних напрямків в частині пропуску поїздопотоків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій вітчизняних досліджень [1] показав, що широкого поширення набув лише аналітичний підхід до визначення пропускної спроможності залізничних дільниць та напрямків. У закордонних дослідженнях [2] отримали розвиток різні методи розрахунків пропускної спроможності залізниць.

Визначення мети та задачі дослідження. На залізницях України на сьогодні за умов неможливості точної оцінки пропускної спроможності є необхідною систематизація різних методів та встановлення їх переваг та недоліків для вибору кращого підходу, що дозволив би підвищити точність розрахунків.

Основна частина дослідження. Всі існуючі методи для оцінки пропускної спроможності залізниць можна розділити на три види: аналітичні методи, методи

оптимізації, а також методи імітаційного моделювання. Аналітичні методи – ґрунтуються на розрахунку пропускної спроможності за допомогою математичних формул або алгебраїчних виразів. Такі методи є простими в розрахунку і зазвичай використовуються для оцінки теоретичної (наявної) пропускної спроможності. Наприклад, на залізницях Польщі практичну пропускну спроможність визначають у відсотках від теоретичної за виразом

$$N_p = (1 - \alpha)N_{\max}, \quad (1)$$

де α – технічна норма резервування, яка відповідно до рекомендацій може приймати значення від 0,2 до 0,3; N_{\max} – теоретична пропускну спроможність, поїздів або пар поїздів.

В основі аналітичних методів лежить спосіб безпосереднього розрахунку пропускної спроможності пристрою, в якому у явному вигляді встановлюється потужність, що витрачається на пропуск одного поїзда або пари поїздів, який виражається часом (поїздо-годинами) заняття елемента, що обмежує пропускну спроможність. У загальному вигляді залежність між цими величинами може бути виражена формулою

$$N = \frac{M - M_n}{m} \alpha_n, \quad (2)$$

де M – загальна потужність пристрою; M_n – частина потужності пристрою, що витрачається на обслуговування потреб, не пов'язаних безпосередньо з рухом поїздів (наприклад, на ремонт шляху, виконання маневрової роботи); m – потужність пристрою, що витрачається на обслуговування одного поїзда або однієї пари поїздів; α_n – коефіцієнт, що враховує частку добового бюджету часу, яка використовується для пропуску поїздів при ймовірних відмовах у роботі технічних засобів.

Розрахунок пропускної спроможності за наведеною формулою, може бути використаний лише при одній структурі поїздопотоків, коли величина m має постійне значення для всіх поїздів. Для розрахунку пропускної спроможності дільниць при різномірній структурі поїздопотоків використовується два принципово різних методи [3].

По одному з них, що розроблений стосовно до умов залізниць України, спочатку встановлюється максимальна

пропускну спроможність в поїздах або парах поїздів категорії, що є переважною (основною) на даній лінії. Поїзда інших категорій через визначені еквіваленти (коефіцієнти зйому) приводяться до поїздів основної (розрахункової) категорії. Так, наприклад, пропускну спроможність дільниць по перегонам розраховується першочергово для паралельного графіку і виражається в поїздах тільки однієї категорії, зазвичай вантажних, а при спеціалізації лінії для пасажирського руху в пасажирських поїздах прийнятої категорії (приміські, дальні). Потім оцінюється вплив на пропускну спроможність поїздів, що слідує з іншими швидкостями, тобто розраховується пропускну спроможність для непаралельного графіку.

Існуючі формули для розрахунку пропускної спроможності використовують постійні величини та ґрунтуються на геометричних характеристиках дільниці, лінійній зміні координат положення поїзда на просторово-часовому графіку і характеризують рух одиночного поїзда, що визначається за результатами тягових розрахунків. Все це призводить до невідповідності теоретичної пропускної спроможності фактичній, яка є значно меншою. Причиною цього є неврахування стохастичного характеру руху поїздів та неможливість обліку характеристик руху групи (потоків) поїздів. Практика і дослідження доводять, що при зменшенні міжпоїздної інтервалу, швидкість поїздів падає, так в середньому рух поїздів на жовтий сигнал світлофору на 30%, а під червоний на 60% нижче, ніж на зелене показання світлофору [4].

В основі існуючого підходу закладено принцип розрахунку на основі обмежуючого перегону тобто в розрізі (перетині), тоді як пропускну спроможність дільниці по своїй суті є показником обслуговування потоків поїздів, на величину якого впливає план і профіль колії на дільниці, технічне оснащення перегонів і станцій, тягово-експлуатаційні характеристики локомотивів, тип графіку руху, маса і довжина поїздів різних категорій, допустимі максимальні швидкості руху, кліматичні умови, вибір машиністами режимів ведення поїздів, тощо.

За іншим методом пропускну спроможність визначають без виділення розрахункової категорії поїздів, а на основі обліку ймовірної природи відносно взаєморозташування на графіку поїздів

різних категорій. Існують методи розрахунку, що дозволяють враховувати утворення черг із-за затримки поїздів на основі теорії масового обслуговування. Дані методи є дуже чутливими до вхідних параметрів інфраструктури, параметрів і структури поїздопотоків, і їх точність дуже залежить від прийнятого способу обліку варіантів розміщення поїздів на дільниці.

Імітаційні методи – засновані на методах програмного моделювання, що дозволяють провести імітацію реального процесу пропуску поїздів з плином часу [5]. Імітаційні методи дозволяють описати випадковий характер процесу перевезень в динаміці. Відомі імітаційні моделі на основі методу Монте-Карло, теорії систем масового обслуговування [6]. Застосування імітаційних методів часто поєднується з методами оптимізації для перевірки знайденого графіку руху на можливість реалізації в умовах впливу випадкових факторів. Окрім академічних моделей існують комерційні програмні продукти, в основі яких використано імітаційні методи (OpenTrack - OpenTrack Railway Technology, SIMONE - Incontrol Enterprise Dynamics, MultiRail - Multimodal Applied Systems) [2]. Недоліком такого підходу є складність практичного пристосування розробленої імітаційної моделі до існуючої інфраструктури залізниць. По суті для кожної дільниці або напрямку необхідним є побудова нової моделі, що вимагає великих витрат часу.

Оптимізаційні методи – засновані на методах математичного програмування для рішення оптимізаційних задач розрахунку насиченого (максимального) розкладу руху поїздів. Дані методи забезпечують вищу точність рішення, ніж проведення розрахунків за аналітичними методами. Даний метод набув широкого використання на залізницях країн ЄС, так дозволяє на основі безпосереднього розрахунку визначати навіть практичну пропускну спроможність. Дослідження таких методів проводились і в Радянському союзі такими вченими як Самаріна Н.О. [7, 8], відділом Обчислювальної техніки “ВНИИЖТа” під керівництвом Тішкіна Є.М. (1974) [9, 10] та групи відомих вчених Воробйова М.О., Каретнікова О.М. тощо [11, 12], але з причин відсутності ефективних ЕОМ та прийнятого математичного апарату практичного застосування дані методи не набули.

На даний час в основі розробки графіку руху поїздів використовують методи теорії розкладів (англ., Scheduling Problem) [13]. В межах проекту EUROPE-TRIS розроблені алгоритми розрахунку пропускну спроможності на основі пошуку максимального графіку при мінімальних витратах на прослідкування всіх поїздів через дільницю, програма FLOU (англ., Flow Line Optimal Utilization), існує можливість визначення пропускну спроможності для оптимізації розкладів руху в умовах заданих заявок операторів на слідування поїздів, програма TCM (англ., Traffic Capacity Management).

Цікавим є освітлення питань щодо розрахунку практичної пропускну спроможності в документах Міжнародної організації, що об'єднує національні залізничні компанії з метою спільного вирішення завдань в області розвитку залізничного транспорту – Міжнародний союз залізниць (МСЗ, англ., UIC). МЗС заснував проект “Capacity Management”, в межах якого у 2004 році був розроблений стандарт щодо дослідження пропускну спроможності UIC 406 R [14]. Даний документ використовує ринково-орієнтований підхід до визначення пропускну спроможності. Проведені дослідження доводять, що в деяких випадках, окремі залізничні дільниці можуть бути перевантаженими, навіть за умови незначної кількості поїздів.

Відповідно до вище описаного в UIC 406 R рекомендовано процедуру розрахунку практичної пропускну спроможності на основі методу оптимізації, що названа як метод ущільнення графіку (англ., timetable compaction method). Метод ґрунтується на так званій процедурі стиснення ниток графіку на заданій дільниці, тобто зближенні всіх ниток одна до одної без порушення їх цілісності та заданих параметрів комерційних зупинок, обгонів часу руху по перегонам. На рис. 1. наведено графік руху до проведення процедури ущільнення. На рис. 2 наведено графік руху після проведення ущільнення, де темним позначена частина пропускну спроможності, що є використаною на дільниці, тоді як сірим – є додаткова (не використана) частина пропускну спроможності, яка може теоретично бути запланована для пропуску додаткових поїздів на дільниці.

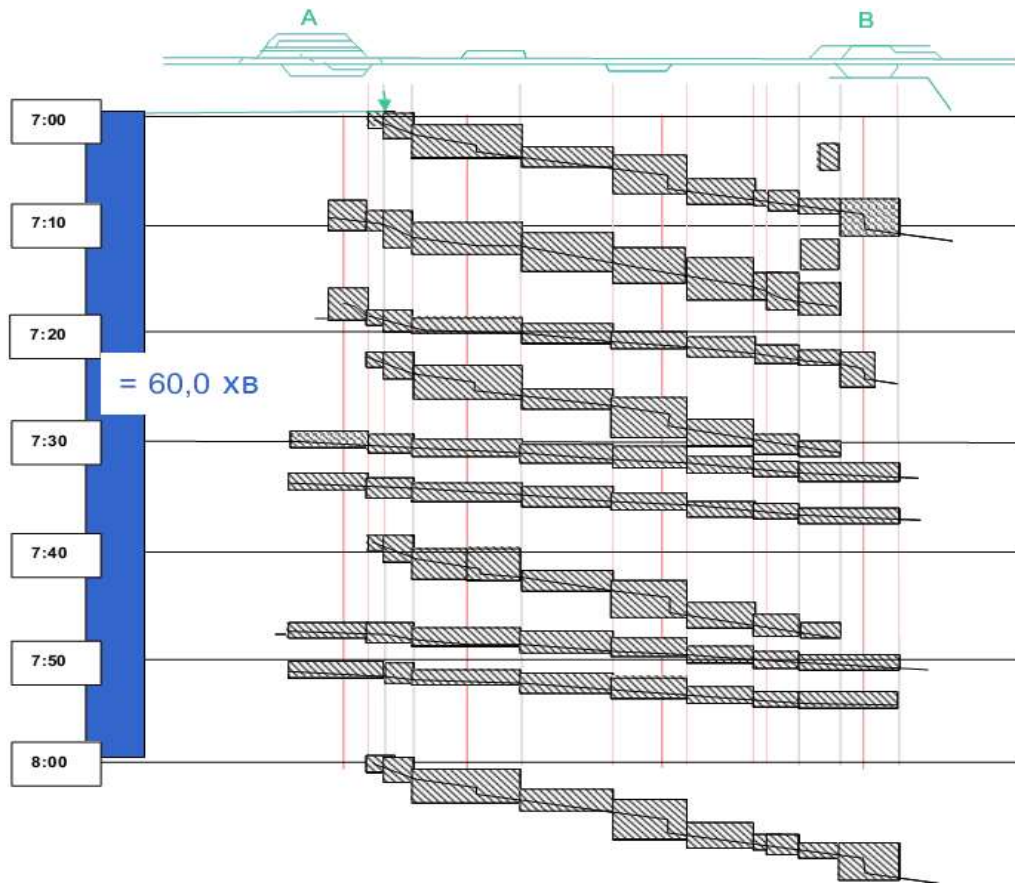


Рис. 1. Графік руху до проведення процедури ущільнення

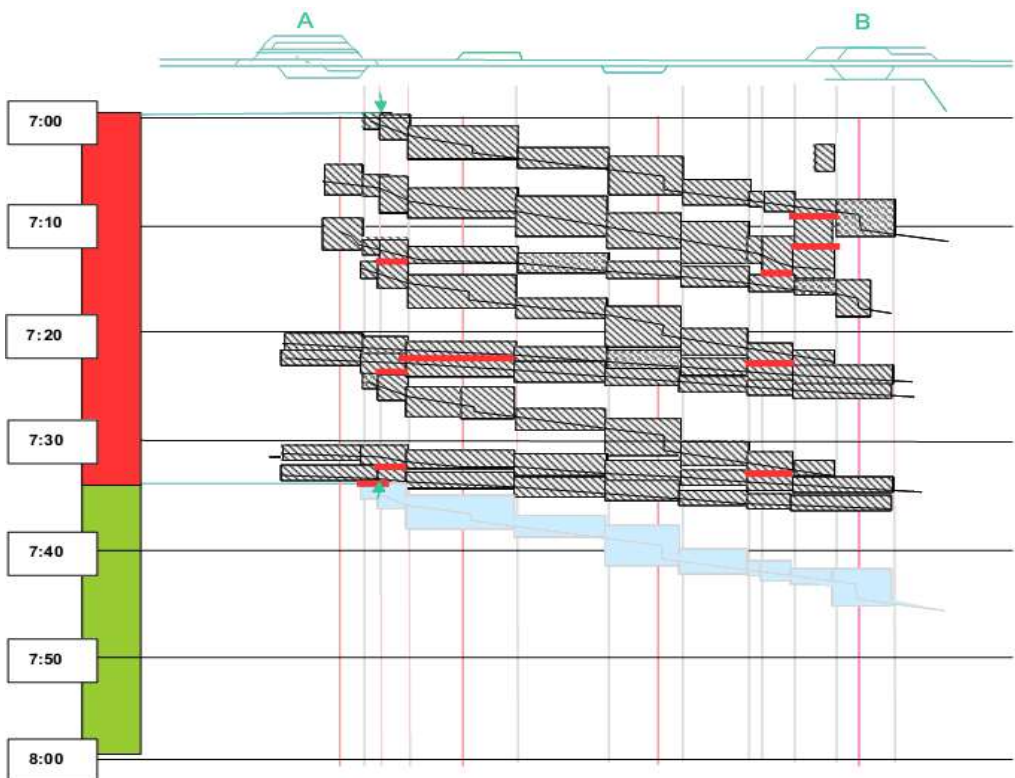


Рис. 2. Графік руху після проведення процедури ущільнення

До знайденого рівня використання пропускної спроможності протягом певного періоду часу, запропоновано додати час для забезпечення рівня стабілізації графіку, час для здійснення операцій схрещення на одноколіїних лініях і при необхідності час для технічного обслуговування. На рисунку 3 наведено діаграму поділу загального розрахункового періоду пропускної спроможності. Формула для визначення пропускної спроможності має наступний вид (рис. 2):

$$k = A + B + C + D, \quad (3)$$

де k – загальний час пропускної спроможності, хв.;

A – зайнятість інфраструктури поїздами, хв.;

B – час для створення буферу, хв.;

C – додатковий час для одноколіїних ліній, хв.;

D – час для технічного обслуговування (технологічне вікно), хв.

Рівень використання пропускної спроможності запропоновано визначати за виразом:

$$K = k \cdot 100 / U, \quad (4)$$

де K – потужність споживання, %;

U – час обраного періоду для розрахунку (I+II), хв.

Якщо визначений рівень використання інфраструктури K вище, ніж рекомендовані типові значення, інфраструктура повинна бути оголошена перевантаженою. Якщо ці типові значення не перевищені, існує надлишкова частка пропускної спроможності, яка може бути використана для пропуску додаткових поїздів відповідно вимог ринку. Дана методологія була застосована на більш ніж 5000 км, щоб виконати її перевірку і отримати рекомендовані значення часу використання інфраструктури, які не повинні бути перевищені. Середні результати такі $K = 75\% - 85\%$ в годину пік і $K = 60\% - 70\%$ в добовому періоді [14].

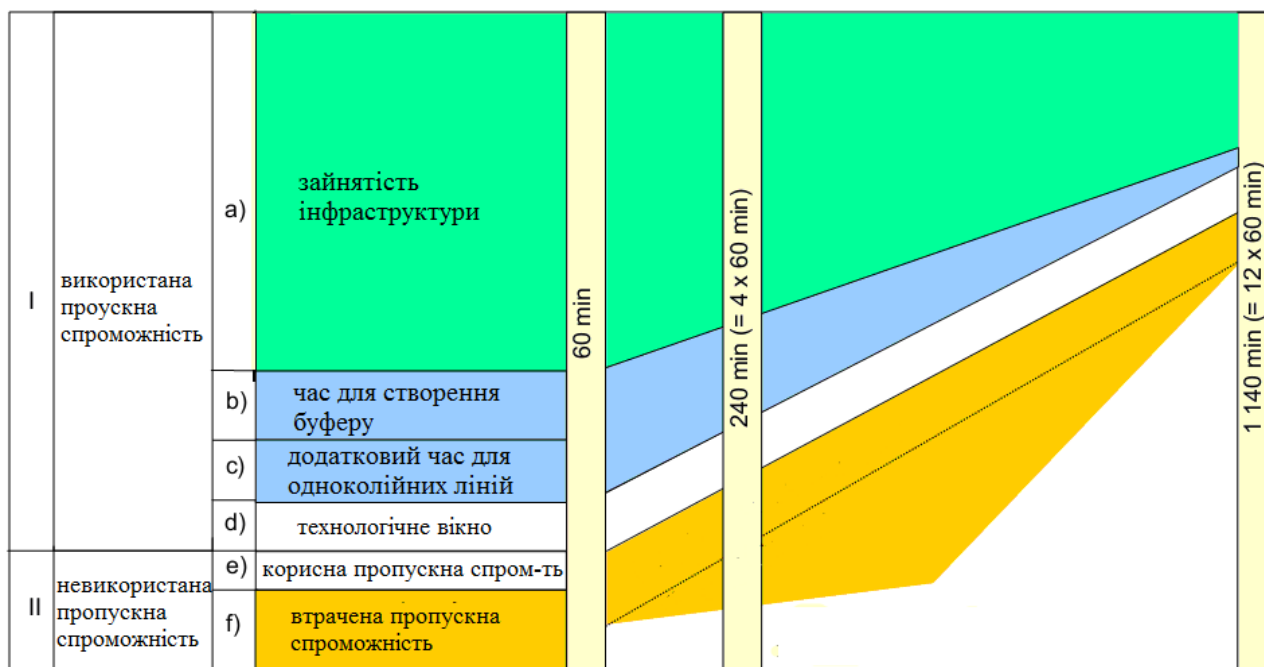


Рис. 3. Номограма поділу загального розрахункового часу пропускної спроможності

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. На основі проведеного аналізу методів розрахунку пропускної спроможності інфраструктури залізниць виявлені переваги і недоліки кожного із

методів. Аналітичні методи є простими в розрахунку і зазвичай використовуються для оцінки теоретичної (наявної) пропускної спроможності, але він не враховує стохастичного характеру руху поїздів та неможливість обліку характеристик руху групи (поток) поїздів. Імітаційні методи дозволяють описати випадковий характер процесу перевезень в динаміці. Недоліком такого підходу є складність практичного пристосування розробленої імітаційної моделі до існуючої інфраструктури залізниць і великі витрати часу. За проведеним дослідженням було зроблено висновок, що

оптимізаційний метод забезпечує вищу точність рішення та є найбільш поширеним у країнах ЄС. Відповідно до виявлених недоліків кожного з методів розрахунку запропоновано застосувати інтегровану методологію на основі використання на першому етапі аналітичних методів для початкового рішення (визначення схеми прокладки), після чого на другому етапі здійснюється пошук графіку руху за допомогою оптимізаційного методу, тоді як, на третьому етапі проводиться перевірка знайденого розкладу шляхом імітаційного моделювання процесу слідування поїздів.

Список використаних джерел

1. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України [Текст], затверджена наказом Укрзалізниця від 14 березня 2001 р. № 143/Ц (ЦД-0036).
2. Österreichische Bundesbahnen (ÖBB), UIC – Capacity Leaflet 3 – Capacity calculations – Final draft ÖBB, 2004.
3. Грунтов, П.С. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте [Текст] / П.С. Грунтов. – М.: Транспорт, 1994.
4. Левин, Д.Ю. Оптимизация потоков поездов [Текст] / Д.Ю. Левин. – М.: Транспорт, 1988. – 175 с.
5. Лещинский, Е. Имитационное моделирование на железнодорожном транспорте [Текст] / Е. Лещинский. – М.: Транспорт, 1977. – 176 с.
6. Barber, F. Survey of automated Systems for Railway Management, Technical Report [Text] / F. Barber, M. Abril, M.A. Salido, L. Ingolotti, P. Tormos, A Lova. // Department of Computer Systems and Computation, Technical University of Valencia, DSIC-II/01/07. – 2007.
7. Самарина, Н.А. Составление двухпутного графика движения поездов на ЭВМ [Текст] / Н.А. Самарина. – М.: Транспорт, 1973. – 123 с.
8. Самарина, Н.А. Применение ЭВМ для разработки графиков движения на направлениях, примыкающих к узлу [Текст] / Н.А. Самарина // Сб. науч. трудов всесоюз. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1974. – Вып. 517. – 136 с.
9. Тишкин, Е.М. График движения поездов в автоматизированной системе управления [Текст] / Е.М. Тишкин. – М.: Транспорт, 1979. – С. 227-266.
10. Тишкин, Е.М. Автоматизация разработки графика движения поездов [Текст] / Е.М. Тишкин // Сб. науч. трудов всесоюз. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1974. - Вып. 517. – 136 с.
11. Каретников, А.Д. Совершенствование графика движения поездов и улучшение использования пропускной способности железнодорожных линий [Текст] / А.Д. Каретников, Н.А. Воробьев. // Тр. ЦНИИ МПС. – М.: Трансжелдориздат, 1960. – Вып. 203. – 222 с.
12. Каретников, А.Д. График движения поездов [Текст] / А.Д. Каретников, Н.А. Воробьев. – М.: Транспорт, 1984.
13. Oliveira, E. A Job-Shop Scheduling Model for the Single-Track Railway Scheduling Problem [Text] / E. Oliveira, B.M. Smith // Research Report University of Leeds, 2000. – 21 p.

14. UIC leaflet 406 R, Capacity. UIC International Union of Railways, France, 2004.

15. Abril, M. An assessment of railway capacity [Text] / M. Abril, F. Barber, L. Ingolotti, M. A. Salido, P. Tormos, A. Lova // Transportation Research Part, 2008 – 44. – P. 774-806.

Рецензент докт. техн. наук, професор О.В.Лаврухін

Прохорченко Андрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра управління експлуатаційною роботою, Українська державна академія залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-88. E-mail: railwayhub@yandex.ua.

Огієнко Вікторія Анатоліївна, магістр, кафедра управління експлуатаційною роботою, Українська державна академія залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-88. E-mail: ogienko89@mail.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.

Ohiienko Viktoriia, master, Department of Management of operational work, Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-88. E-mail: ogienko89@mail.ru.