

Ю. В. ЧИБІСОВ (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІЖ ШВИДКІСТЮ, ГУСТИНОЮ ПОТОКУ ТА ІНТЕНСИВНІСТЮ РУХУ ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЧНІЙ ДІЛЬНИЦІ

Виконано аналіз залежностей між швидкістю, густиною потоку та інтенсивністю руху поїздів на залізничній дільниці. Встановлено залежності вихідного і вхідного потоків поїздів від густини поїздів на дільниці; залежність вхідного потоку від швидкості руху, а також встановлено взаємозв'язок між середнім часом ходу поїздів по дільниці та точністю реалізації швидкості.

Ключові слова: залізнична дільниця, інтенсивність руху, вхідний потік поїздів, густина поїздопотоків, імітаційне моделювання.

Выполнен анализ зависимостей между скоростью, плотностью потока и интенсивностью движения поездов на железнодорожном участке. Установлены зависимости выходящего и входящего потоков поездов от плотности поездов на участке, зависимость входящего потока от скорости движения, а также установлена взаимосвязь между средним временем хода поездов по участку и точностью реализации скорости.

Ключевые слова: железнодорожный участок, интенсивность движения, входящий поток, плотность поездопотока, имитационное моделирование.

The analysis of the relationships between speed, trainflow density and intensity of the train at the railway line was made. The dependences of the incoming and outgoing flows of trains on the density of trains were established. There was also established the dependence of the incoming flow on the speed and the average travel time of trains on the line and the accuracy of the speed.

Thus, it was analyzed the relationship between speed, density and traffic flow of trains on the railway station. There was established that the saturation of the traffic capacity causes a drop in average speed. Furthermore, we can conclude that it is impossible to achieve maximum traffic capacity, which is calculated according to analytical formulas. In fact, it was possible to reach approximately 90% of the traffic capacity compared to the analytical calculations. Furthermore, it should be noted that in case there are more than 70 % of maximum quantity of trains on a railway line, there is a sharp decrease of the average speed rate.

Thus, for each railway line it is necessary to determine the value of a rational saturation, and in case it is overloaded it is reasonable to reroute some trains on parallel railway lines.

Key words: railway line, trainflow density, incoming flow of trains, intensity of traffic, computer-aid simulation.

Вступ

Для залізничного транспорту України характерна постійна зміна структури та обсягів вантажо- і поїздопотоків. Зниження інтенсивності поїздопотоків може негативно вплинути на показники роботи залізниць, як кількісні, так і якісні, у тому числі і на терміни доставки вантажів у строк. В свою чергу, підвищення інтенсивності поїздопотоків викликає необхідність вибору альтернативних маршрутів пропуску поїздів на мережі залізниць. У зв'язку з цим, проблема пошуку шляхів адаптації залізниць до наслідків коливань вантажопотоків та зміни їх структури є досить актуальною для залізничного транспорту України.

Аналіз досліджень та публікацій

На сучасному етапі розвитку інформатизації галузі завдяки комплексному використанню технічних засобів зв'язку та ЕОМ в єдиному диспетчерському центрі з'явилися можливості реалізувати поїзну, вагонну, вантажну та економічну моделі перевізного процесу, досягаючи основної мети роботи залізниць – раціонального використання ресурсів і зменшення витрат, з одночасним поліпшенням використання основних засобів і, нарешті, отримання максимальних прибутків.

У роботах [1-3] розглядається оптимізація розподілу поїздопотоків по залізничній мережі за допомогою імітаційного моделювання. Так, в роботі [2] виконано дослідження впливу заповнення дільниць залізничного вузла на показники його роботи. З'ясовано, що при завантажен-

ні дільниць більше, ніж на 70 %, використовувати аналітичні формули для розрахунку показників недоцільно. В роботі [3] виконана серія експериментів на імітаційній моделі залізничного напрямку та отримано залежності зміни показників руху поїздів від інтенсивності вхідного потоку.

В розглянутих наукових роботах використовувалися різні методи рішення задачі розподілу поїздопотоків по залізничній мережі та різні критерії оптимальності. Критеріями запропоновано використовувати прямі експлуатаційні витрати при наявному рівні технічного оснащення залізничних дільниць, приведені вагоно-години, що в тому числі враховують енергетичні та часові витрати локомотивного парку через коефіцієнти приведення.

Формулювання мети та задачі досліджень

Дослідження, проведені у роботах [1 – 3], дозволяють стверджувати наступне: при вирішенні практичних задач регулювання і управління поїздопотоками, технічному нормуванні та оперативному плануванні поїзної роботи, а також аналізі закономірностей в організації руху поїздів доцільно користуватись наступним співвідношенням [4]:

$$n = \lambda \cdot V, \quad (1)$$

де n – інтенсивність руху, поїздів/год.;

λ – густина потоку, поїздів/км;

V – швидкість руху поїздів, км/год.

Якщо відомі дві з цих трьохзмінних, то третя визначається однозначно. Серед змінних, що розглядаються, немає такої, яка б залежала тільки від одного параметра. Але оскільки інтенсивність є кількісною характеристикою перевізного процесу, а швидкість відображає рівень технічного оснащення дільниць і розвитку рухомого складу, то їх слід вважати незалежними змінними, а густину – залежною. Крім уже перелічених середніх значень, велике практичне і теоретичне значення має визначення наступних величин:

- максимальна інтенсивність руху;
- швидкість руху поїздів у вільних умовах (у відповідності з тяговими розрахунками або графіком руху);
- швидкість, при якій інтенсивність руху максимальна ($n = n_{\max}$);
- максимальна густина, при якій рух поїздів неможливий ($V \rightarrow 0$);
- густина, при якій інтенсивність руху максимальна ($n = n_{\max}$).

Залежність «інтенсивність-густина» є основною діаграмою потоку поїздів [4], яка показана на рис. 1. Із зростанням густини потоку поїздів інтенсивність збільшується до максимального значення, що відповідає наявній пропускній спроможності дільниці (точка В).

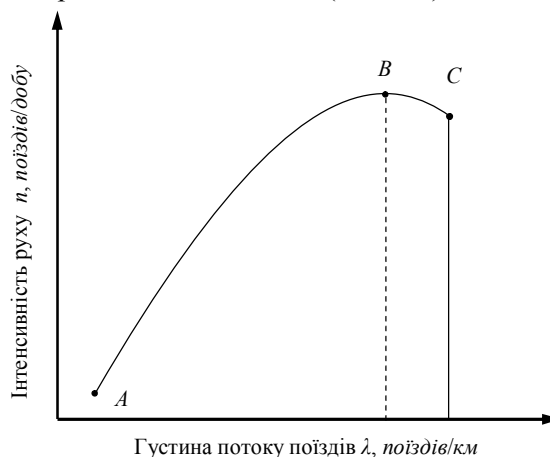


Рис. 1. Залежність між інтенсивністю руху n і густиною потоку поїздів λ

Починаючи з цієї точки, збільшення інтенсивності на вході дільниці не призводить до збільшення на виході, про що говорить зниження інтенсивності при подальшому збільшенні густини потоку. Вертикальна пунктирна лінія, проведена з точки В, немов розділяє умови руху поїздів без затримок (зліва) і з затримками (справа). Точка А характерна для вільних умов руху поїздів без затримок. Точка С характерна для вільних умов руху з затримками та показує, що таку ж інтенсивність можна досягнути при значно меншій густині потоку, тобто утримання надлишку робочого парку вагонів не призводить до збільшення кількісних показників, а навпаки, зменшує їх та погіршує якісні показники експлуатаційної роботи дільниці.

Для характеристики використання пропускної спроможності дільниці будемо користуватися рівнем завантаження, який представляє відношення досягнутої інтенсивності руху n до максимальної інтенсивності n_{\max} даної дільниці [5]:

$$\gamma = \frac{n}{n_{\max}}. \quad (2)$$

За допомогою цього поняття можна отримати співставимі характеристики потоку поїздів на різних дільницях, так як γ – величина безрозмірна і може приймати будь-які значення від 0 до 1.

В залежності від швидкості потоку і його густини (див. рис. 2) початкова ділянка кривої відповідає вільному руху поїздів.

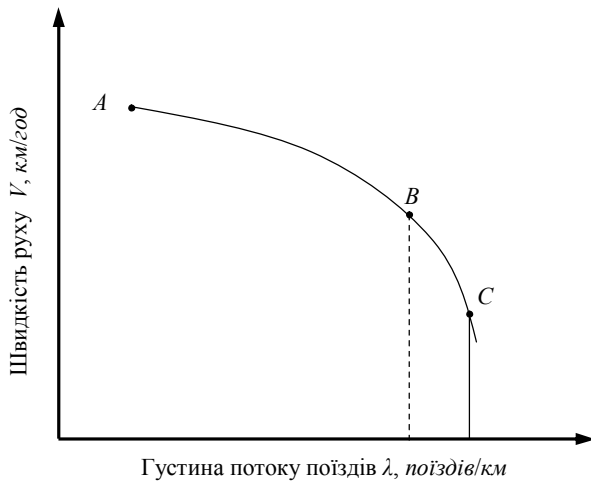


Рис. 2. Залежність між швидкістю V і густиною потоку поїздів λ

При збільшенні густини потоку швидкість руху зменшується у зв'язку зі зменшенням середнього міжпоїздного інтервалу та зростанням впливу поїздів один на одного. Швидкості руху у вільних умовах V_B відповідає точка А. Ця швидкість визначається тяговими розрахунками. Якісний стан потоку можна характеризувати за допомогою понять коефіцієнта швидкості руху і рівня насиченості поїздами [4].

Коефіцієнт швидкості руху U – це відношення максимальної допустимої швидкості V_d при досягнутій густині до швидкості вільного руху V_B [4]:

$$U = \frac{V_d}{V_B} \quad (3)$$

Коефіцієнт швидкості руху дозволяє оцінити вплив різної густини потоку на швидкість. Величина U безрозмірна і може приймати будь-які значення від 0 до 1.

Рівень насиченості дільниці – відношення густини потоку λ при різних розмірах руху до максимальної густини λ_{max} [4]:

$$\rho = \frac{\lambda}{\lambda_{max}} \quad (4)$$

При збільшенні інтенсивності до максимального значення, що відповідає точці В, швидкість руху поїздів (дивись рис. 3) зменшується.

Частина кривої, що розташована вище точки В, відповідає нормальним умовам руху без за-

тримок поїздів, нижня частина кривої – умовам руху з затримками. Точки А і С на кривій «швидкість-інтенсивність» відповідають аналогічним точкам на кривій «інтенсивність – густина».

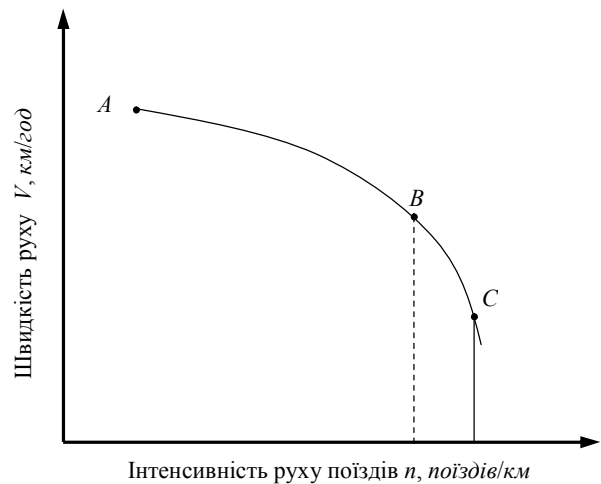


Рис. 3. Залежність швидкості V та інтенсивності руху n

Найважливішою характеристикою дільниць є максимальна інтенсивність потоку поїздів (пропускна спроможність) [4, 5]. Від використання пропускної спроможності та оптимізації її розвитку великою мірою залежить задоволення потреб населення в перевезеннях вантажів і пасажирів.

Як показав аналіз літературних джерел [5-9], в теперішній час розрахунок пропускної спроможності дільниці полягає у визначенні так званого обмежувального перегону. Для цього перегону визначається кількість поїздів, що може бути пропущено, в залежності від технічного оснащення дільниці, та засобу організації руху поїздів.

Пропускна спроможність дільниці за своєю суттю є показником обслуговування потоку поїздів, на величину якої впливають план і профіль колії, технічне оснащення перегонів і станцій, тягово-експлуатаційні характеристики локомотивів, тип графіка руху, вага та довжина поїздів різних категорій, допустимі максимальні швидкості руху, кліматично-погодні умови та ін. Дуже важливим у цьому відношенні є також вибір машиністами режимів керування поїздами.

Якщо припустити, що потік складається із вантажних поїздів з однорідними технічними характеристиками, а машиністи володіють однаковими навичками керування, то при між по-

ізнному інтервалі 6 хв. та ідеальних умовах пропускна спроможність дільниці повинна досягати 240 поїздів за добу. Співвідношення умов, що забезпечують можливість руху з такою інтенсивністю, буває надзвичайно рідко, а при виникненні подібної ситуації потік поїздів стає надзвичайно нестійким. Звідси, в свою чергу слідує, що реалізувати вказану максимальну пропускну спроможність практично неможливо. Тому, розглядаючи рух поїздів та оцінюючи можливу інтенсивність потоку, необхідно характеризувати по суті не тільки дільницю, а при відповідних умовах – комплекс (потік поїздів-машиністи-дільниця). Це пояснюється тим, що машиністи можуть оказувати не менший вплив на пропускну спроможність, ніж параметри дільниці. Так, якщо повністю замінити людину-машиніста автоматичною системою керування поїздом, то пропускна спроможність може бути суттєво збільшена. Великий вплив на пропускну спроможність оказує і характеристика потоку поїздів (швидкість, густина, однорідність та ін.).

Про необхідність визначення пропускної спроможності не в розрізі, а на всій довжині дільниці свідчить змінення реакції дільниці на різні розміри руху поїздів. За цією реакцією можна слідкувати через взаємозв'язок інтенсивностей вхідного потоку поїздів і вихідного з дільниці транзитного потоку. Залежність інтенсивностей вхідного і вихідного потоків в загальному вигляді згідно з [4] наведена на рис. 4.

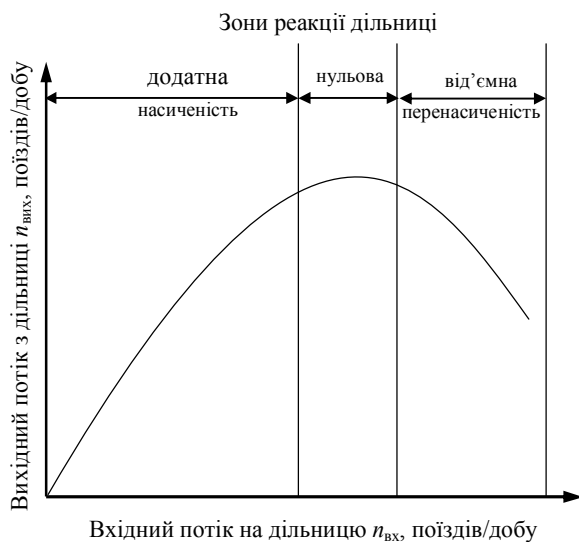


Рис. 4. Реакція дільниці на змінення інтенсивності потоку поїздів

Початкова ділянка цієї залежності може бути апроксимована лінійною функцією і відпові-

дає додатній реакції дільниці на зростання інтенсивності вхідного потоку поїздів, тобто будь-яке збільшення вхідного потоку призводить до зростання вихідного потоку. Дільниця зберігає додатну реакцію до тих пір, поки не буде досягнуто стану насиченості поїздами. Після цього подальше збільшення інтенсивності вхідного потоку поїздів практично не призводить до зростання вихідного потоку. При досягненні стану перенасичення будь-яке збільшення інтенсивності вхідного потоку поїздів знижує розмір вихідного потоку. Остання обставина має місце в тих випадках, коли з ростом кількості поїздів на дільниці швидко збільшується густина їх розміщення; слідування на зелене показання світлофора усе частіше змінюється на жовте та червоне (дивись рис. 5).

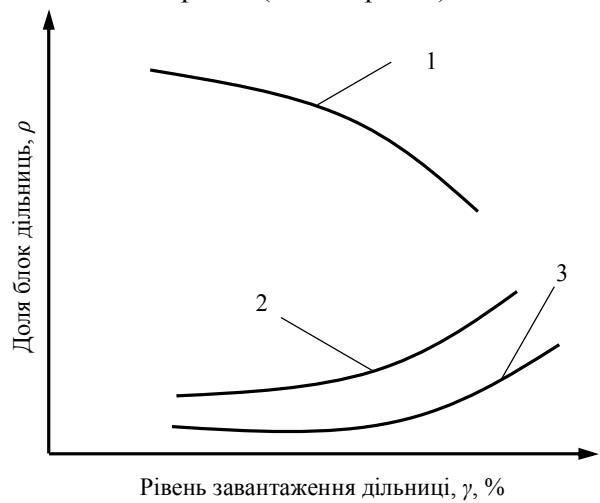


Рис. 5. Залежність доли (ρ) блок-дільниць, яку поїзди проходять на зелений (1), жовтий (2) та червоний (3) сигнали світлофорів від рівня заповнення дільниць поїздами (γ).

В середньому швидкість руху поїздів на жовтий сигнал світлофора на 30 %, а на червоний – на 60 % нижче, ніж на зелене показання світлофора. В результаті із-за збільшення часу ходу, поїзди, що відправлені на дільницю, за період часу T не встигають доїхати до кінцевого пункту за розрахунковий період (див. рис. 6). Це має велике практичне і теоретичне значення.

На рис. 6 показано, що збільшення кількості поїздів на дільниці зверх максимального графіка не тільки не сприяє збільшенню розмірів руху, але й не дозволяє виконати нормативи графіка та погіршує використання пропускної спроможності дільниці.

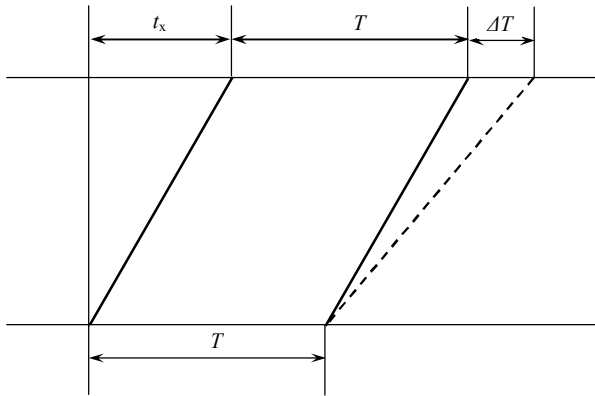


Рис. 6. Фрагмент графіка руху поїздів

Встановлена зміна реакції дільниці на різні розміри руху поїздів потребує уточнення поняття пропускної спроможності, яке повинно розглядатися ні в одному розрізі, а по всій довжині дільниці. Тоді пропускною спроможністю дільниці є максимальна інтенсивність, при якій потік поїздів може пройти по всій дільниці, протягом певного відрізка часу, зміщеного на виході дільниці на величину часу ходу, в залежності від технічного оснащення і способу організації руху.

В теперішній час пропускну спроможність, наприклад, двоколійної дільниці згідно з [5] визначають за формулою:

$$n = \frac{(1440 - t_{\text{техн}}) \cdot \alpha_n}{I_p}, \quad (5)$$

де $t_{\text{техн}}$ – час на виконання робіт по поточному утриманню колії, споруд та пристроїв, хв.;

α_n – коефіцієнт, що враховує вплив відмов у роботі технічних пристроїв на наявну пропускну спроможність перегонів, хв.;

I_p – розрахунковий міжпоїзний інтервал, хв.

Як видно, найбільш ефективним способом збільшення пропускної спроможності двоколійних ліній є зниження міжпоїзного інтервалу. Проте практика та дослідження [1-3] показали, що інтервал між поїздами не може бути зменшений до скільки завгодно малої величини (навіть при забезпеченні безпеки руху поїздів). Крім того, при зменшенні міжпоїзного інтервалу зростає розрив між фактичною і теоретичною пропускною спроможністю.

Причинами відхилення реальної пропускної спроможності від теоретичної є використання сталих величин в формулах визначення пропускної спроможності та відсутність характеристик потоку поїздів. Існуючі методики розрахунку пропускної спроможності виходять з гео-

метричних характеристик дільниці, лінійного виміру координат положення поїзда на просторово-часовому графіку і характеризують рух одиночного поїзда. Це не зовсім вірно. Стохастичний характер руху поїздів вимагає враховувати слідування не окремого (одиночного) поїзда, а груп (поток) поїздів; густина потоку (насиченість дільниці поїздами); розподіл швидкості руху, інтервалів між поїздами та інтенсивність потоку.

Виходячи з основних характеристик потоку поїздів, пропускну спроможність дільниці можна описати формулою (1). Густина потоку поїздів може прийматися годинна, добова, місячна, річна і за відповідний період буде отримана пропускна спроможність, але формула (1) вірна лише при невеликому завантаженні дільниці поїздами. Оскільки збільшення густини потоку поїздів призводить до зменшення швидкості руху, вірна функціональна форма виразу (1) буде мати вигляд:

$$n(\lambda) = \lambda \cdot V(\lambda). \quad (6)$$

Швидкість руху поїздів розподілена у межах деякого діапазону, тому доцільно визначити два види середніх швидкостей (просторову і часову) та відповідно дві густини розподілу ймовірностей швидкостей. Просторова густина розподілу швидкостей $f_s(V)$ визначається для поїздів, що займають дільницю в заданий момент часу, часова густина розподілу швидкостей $f_t(V)$ – для поїздів, що проходять дану точку дільниці за даний проміжок часу.

Висновки

Таким чином, було виконано аналіз залежності між швидкістю, густиною потоку та інтенсивністю руху поїздів на залізничній дільниці. Встановлено, що при насиченні пропускної спроможності відбувається різке падіння середньої швидкості руху. Крім того, можна зробити висновок, що досягти максимальну величину пропускної спроможності, яка розрахована за аналітичними формулами, в моделі не вдалося. Фактично було пропущено 90 % поїздопотоку, порівняно з аналітичними розрахунками. Крім того, слід зазначити, що при заповненні залізничної дільниці поїздами більше, ніж на 70 %, відбувається різке зростання вартості їх пробігу.

Отже, для кожної дільниці необхідно з'ясувати величину раціонального заповнення, при

перевищенні якої доцільно розглядати варіанти перерозподілу потоків поїздів по паралельних дільницях залізничної мережі.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Музикіна, Г. І. Моделювання пропуску поїздів по ділянкам залізничного вузла [Текст] / Г. І. Музикіна, Ю. В. Чибісов, О. В. Хитрич // Зб. мат. Міжн. наук.-практ. конф. «Транспортні зв'язки. Проблеми та перспективи». – Д.: ДІПТ, 2008. – С. 45–46.

2. Музикіна, Г. І. Дослідження впливу розмірів руху на показники роботи залізничної мережі [Текст] / Г. І. Музикіна, Ю. В. Чибісов // Сб. трудов 10-й Междун. конф. по транспорту и логистике – 2007 г.

3. Козаченко, Д. М. The use of simulating methods for the railway line research [Текст] / Д. М. Козаченко, Ю. В. Чибісов // Труды IV Междунар. науч. студ. конф. «TRANS-МЕСН-АТ-СНЕМ» – М. 2006 – С. 174.

4. Левин, Д. Ю. Оптимизация потоков поездов [Текст] / Д. Ю. Левин. – М.: Транспорт, 1988. – 175 с.

5. Левин, Д. Ю. Расчет пропускной способности участка [Текст] / Д. Ю. Левин // Железнодорожный транспорт. – 2003. – № 8. – С. 18–23.

6. Юнушкин А. А. Распределение потоков в транспортных сетях (зарубежный опыт) [Текст] / А. А. Юнушкин // Вестник транспорта. – 2007. – № 12. – С. 31-34.

7. Newman, M. The structure and function of complex networks. SIAM Review, 2003. – 45. – P. 167-256.

8. Campbell, S. Modeling and Simulation in Scilab/ S. Campbell // Scicos – New York: Springer, 2006. – 313 p

9. Форд, Л. Р. Потоки в сетях. [Текст] : [Перевод с англ.] / Л. Р. Форд., Д. Р. Фалкерсон. – М.: «Мир», 1966. – 372 с.

10. Бобровский, В. И. Моделирование системы управления пропуском поездов через пересечения [Текст] / В. И. Бобровский // Концепція підвищення ефективності вантажних перевезень на залізничному транспорті // Міжвуз. зб. наук. пр. – Вип. 33. – Х.: ХарДАЗТ, 1998. – С. 71-79.

11. Бобровский, В. И. Имитационная модель развязки линий в железнодорожном узле [Текст] / В. И. Бобровский // Концепція підвищення ефективності вантажних перевезень на залізничному транспорті // Міжвуз. зб. наук. пр. – Вип. 38. – Х.: ХарДАЗТ, 1999. – С. 35-42.

Надійшла до редколегії 01.10.2013.

Прийнята до друку 03.10.2013.