

УДК 656.2.02.001.57

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ

Роговий А.С., Хорошилов Д.В.

USE OF SIMULATION MODELING METHODS FOR CALCULATION OF RAILWAY STATIONS CAPACITY

Rogovoy A.S., Horoshilov D.V.

У статті приведено результати розрахунку пропускної здатності залізничної станції на основі методів імітаційного моделювання та лінійного програмування. Проаналізовано методи, що використовуються для моделювання транспортних систем: аналітичний, теорія масового обслуговування, графічний метод та імітаційне моделювання. Перевірено адекватність отриманих результатів за допомогою U-критерію Манна-Уїтні. Результати розрахунків показали, що найточніший результат має імітаційне моделювання, а аналітична формула, що найчастіше використовується при розрахунках, має помилку до 90 відсотків.

Ключові слова: залізничний транспорт, лінійне програмування, імітаційна модель, пропускна здатність, залізнична станція.

Вступ. Залізниця - ключова ланка в транспортній системі, яка забезпечує вантажні та пасажирські перевезення на території України. Вони сприяють зростанню економіки країни, розвитку її промисловості і прискоренню науково-технічного прогресу. Функціонування багатолінійних та багатофазних систем залізничного транспорту характеризується значними коливаннями, тому що розподіл транспортних потоків в них нестационарний та існують складні ймовірнісні зворотні зв'язки й залежності між різноманітними елементами.

Постановка проблеми. На даний час при проектуванні систем залізничного транспорту перевага віддається аналітичним залежностям, що були перевірені багаторічним досвідом їх використання. Але, як показує практика, в багатьох випадках є досить велика помилка між розрахунковими значеннями, отриманими за допомогою аналітичних залежностей і реальними параметрами внаслідок того, що в аналітичних залежностях не усі фактори, що можуть чинити вплив, враховані. Тому вирішення практичних задач тільки аналітичними методами часто сполучено із великими ймовірностями отримання не

досить точного результату [1, 8, 9]. За останні кілька десятиліть накопичився досвід використання тих або інших методологічних підходів і моделей для розрахунку й оптимізації транспортних систем взагалі, і систем залізничного транспорту зокрема [2, 6, 7, 10]. Але аналіз показує, що часто методи використовуються некоректно [5].

На залізничному транспорті одним з найважливіших параметрів є пропускна здатність [3, 4, 11]. Під пропускною здатністю звичайно розуміють максимальне число поїздів установленної ваги, що може бути пропущено через станцію протягом доби при найкращому використанні постійних пристроїв і прийнятої технології роботи [3]. Фактичні можливості станції пропускати поїздопотік можуть виявитися або вище максимальної розрахункової величини, або нижче її, тому що порядок використання постійних пристроїв змінюється залежно від сформованих експлуатаційних умов. Організація руху поїздів, технологія роботи станції не можуть бути заздалегідь, на всі випадки життя, визначені як найвигідніші, найкращі. По своїй сутності пропускна здатність станції - величина багатоелементна [3].

У розрахунках пропускної здатності станцій аналітичний метод є найпоширенішим. Станція розбивається на елементи, що розраховують ізольовано. Пропускна здатність звичайно визначається в поїздах або парах поїздів однієї якої-небудь категорії. Інші пересування розглядаються як постійні операції, на виконання яких затрачається частина розрахункового періоду [4]. Але ці аналітичні розрахунки мають досить високу помилку, тому розрахунок пропускної здатності залізничних станцій потребує більш досконалих методів розрахунку, яким є імітаційне моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сучасне імітаційне моделювання застосовується в основному для дослідження ситуацій та систем,

що можна описати як системи масового обслуговування. Це не обмежує застосування імітаційного моделювання, оскільки на практиці будь-яку ситуацію дослідження операцій або прийняття рішень можна тією чи іншою мірою розглядати, як систему масового обслуговування. Із цієї причини методи імітаційного моделювання знаходять широке застосування в задачах, що виникають у процесі створення систем масового обслуговування, систем зв'язку; в економічних і комерційних завданнях, включаючи оцінки поведінки споживача, визначення цін, економічне прогнозування діяльності фірм; у соціальних та соціально-психометричних завданнях; на транспорті; у задачах аналізу військових стратегій і тактик.

Основний недолік існуючого розрахунку пропускної здатності залізничних станцій за коефіцієнтом завантаження полягає в припущенні, що в міру вичерпання пропускної здатності елемента витрата часу на одну операцію не змінюється, або резерв із ростом кількості поїздів N_{ϕ} знижується лінійно. В дійсності: чим більше фактичне завантаження, тим помітніше відхилення резерву від прямолінійного графіка. Результати розрахунку за коефіцієнтом завантаження виявляються завищеними на величину $\varepsilon = N'_{\max} - N''_{\max}$. Більш надійний результат забезпечує графічний метод, що широко застосовувався для розрахунку станцій ще в дореволюційний період. Він наочний і простий, але досить трудомісткий. До початку 50-х років відноситься розробка так називаного графоаналітичного методу, що сполучає користування номограмами та емпіричними коефіцієнтами з підрахунком результуючих величин по аналітичних формулах. Графічний розрахунок незмірно ближче до дійсності, чим розрахунок аналітичний. Він завжди дає цілочислове рішення, погоджує роботу основних ланок станції, але найбільш точно дійсність може відображати тільки диспетчерський графік [3].

Мета і постановка задачі. Метою роботи є збільшення точності розрахунку пропускної здатності залізничних станцій за рахунок використання сучасних методів імітаційного моделювання.

Результати досліджень. Відомо, що пропускна здатність станції залежить від того, у якій послідовності використовуються станційні колії, як сполучається місцева станційна робота з поїзною. Найкращий результат виходить у тому випадку, якщо є можливість передбачати так називані конфліктні ситуації. Тоді можна планово, за прийнятим критерієм, вибрати оптимальну черговість пересувань. Відомо, що число поїздів установленої ваги не повністю характеризує складність структури пересувань по станції. Завантаження її елементів залежить від того, звідки й куди пропускаються поїзди, у якій послідовності займаються й звільняються елементи станції, у якій черговості виробляються пересування. Для кожної станції, існує порядок роботи, при якому досягається найвища пропускна здатність усього комплексу пристроїв, але його практично не можна до-

сити швидко відшукати перебором всіх можливих варіантів графіка й технології навіть із використанням ПК.

Поряд з максимальною варто розрізняти так називану ефективну пропускну здатність. Оскільки рух поїздів здійснюється організовано (за графіком), прокладка ниток графіка повинна вироблятися з деяким резервом, що забезпечує стабільність намічаного графіка, що гарантує виконання встановлених якісних показників роботи дільниць і станцій. Із цього йде, що ефективна пропускна здатність (граничне середнє завантаження) завжди виявляється нижче граничного максимального завантаження.

Для дослідження транспортних систем, в тому числі й дослідження пропускної здатності, найчастіше використовують аналітичний детермінований метод розрахунку, теорію масового обслуговування, графічний метод та імітаційне моделювання. Але використання кожного з вищенаведених методів може привносити деяку помилку у розрахунки. Порівнювальна оцінка, проведена в [4] показує, що явну перевагу має метод імітаційного моделювання, але він є дуже трудомістким й недостатньо продуктивним, коли є багатоваріантність. Результати порівняння різних методів наведено на рис. 1.

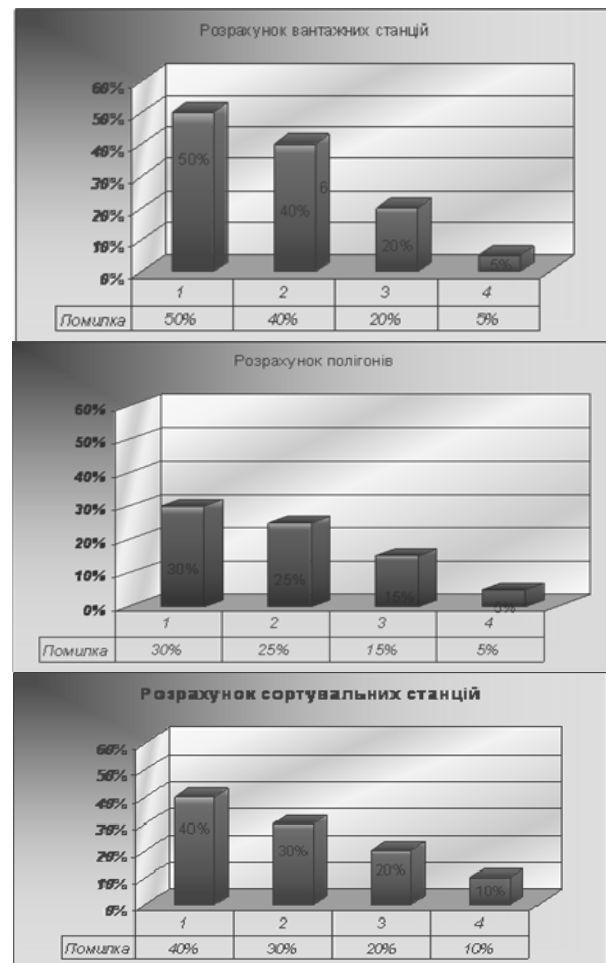


Рис. 1. Порівнювальна оцінка методів розрахунку при дослідженні транспортних систем

Нами було виконано розрахунок пропускної здатності залізничного перетинання (рис. 2) за допомогою різних методів моделювання таких як: лінійне програмування, моделювання за допомогою теорії масового обслуговування, аналітичні формули, що виведені за допомогою апарату теорії ймовірності та імітаційне моделювання.

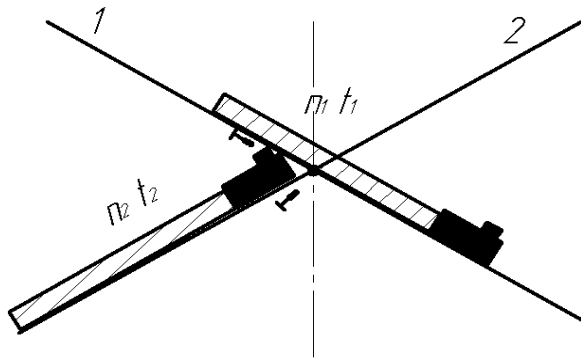


Рис. 2. Залізничне перетинання

Аналітичних формул для залізничного перетинання є декілька. Самий простий спосіб розрахунку базується на підрахунку сумарної тривалості заняття точок перетинання маршрутів. Для заданих розмірів руху по перетинанню N_1 й N_2 і тривалості заняття перетинання t_1 й t_2 визначається сума:

$$\sum_{i=1}^n N_i t_i = N_1 t_1 + N_2 t_2$$

де $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – число маршрутів, що перетинаються.

Знайдена сума деякою мірою дає уявлення про використання пропускної здатності.

У більш складних випадках, коли маршрути, що перетинаються, нерівноправні, підрахунок сумарної тривалості заняття перетинання втрачає практичний зміст.

Аналітична формула, яка використовується на даний час базується на ймовірнісному підрахунку тривалості затримок рухомого складу на перетинаннях. У найпростішому випадку сумарна тривалість затримок по кожній точці перетинання дорівнює:

для рівноправних маршрутів:

$$\sum^{N_1+N_2} T_{1,2} = \frac{N_1 N_2}{2T_p} (t_1^2 + t_2^2);$$

для нерівноправних маршрутів:

$$\sum^{N_2} T_{1,3} = \frac{N_1 N_2}{2T_p} (t_1 + t_2)^2,$$

де T_p – тривалість розрахункового періоду.

Для більш складних випадків запропоновані відповідні формули, які дають можливість орієнтовно оцінити величину очікуваних затримок рухомого складу. Однак порівняння розрахункових значень затримок з результатами імітаційного моделювання показує на значні погрішності розрахункових значень, звичайно в меншу сторону.

Результати розрахунків показали, що найточніший результат має імітаційне моделювання, а аналітична формула, що найчастіше використовується при розрахунках має погрішність до 90% (рис. 3).

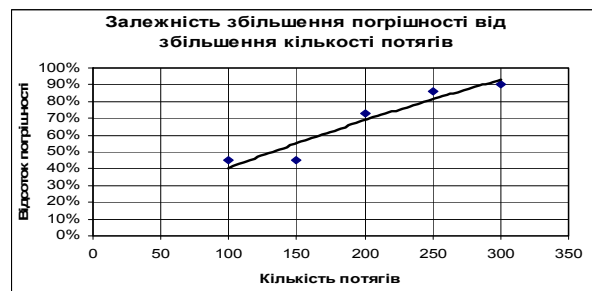


Рис. 3. Розбіжність результатів розрахунків за аналітичною формулою та імітаційним моделюванням

Аналізуючи рис. 3 можна бачити, що помилка розрахунку за аналітичною формулою збільшується зі збільшенням пропуску поїздів, що можна пояснити зростанням похибки при ймовірнісному аналізі. Для розрахунку пропускної здатності залізничної станції використалося імітаційне моделювання за допомогою програмних комплексів та було спроєктовано граф імітаційної моделі руху поїздів маршрутів через стрілки та колії, що дало змогу підтвердити збільшення пропускної здатності. Програми, що дозволяють використати апарат імітаційного моделювання, сприяють збереженню фінансових витрат, що не потрібно використати для коштовних експериментів.

Адекватність розрахунків перевірялася за U-критерієм Манна-Уїтні, який є непараметричним статистичним критерієм, що використовується для оцінки відмінностей між двома вибірками за рівнем будь-якої ознаки, виміряних якісно. Він дозволяє виявити відмінності в значенні параметра між малими вибірками. Чим менше значення критерію, тим ймовірніше, що відмінності між значеннями параметра в вибірках достовірні.

Таким чином, в роботі проаналізовано методи визначення пропускної здатності залізничних станцій. Результати математичного моделювання за аналітичним методом та методом лінійного програмування потребують перевірки адекватності, яка проведена методами імітаційного моделювання за допомогою комп'ютерних програмних продуктів.

Висновки.

1. На основі імітаційного моделювання збільшено точність розрахунку пропускної здатності залізничних станцій, на прикладі розрахунку залізничного перетинання.

2. Результати розрахунків показали, що найточніший результат має імітаційне моделювання, а аналітична формула, що найчастіше використовується при розрахунках має погрішність до 90%.

3. Із заданою довірчою ймовірністю за допомогою U-критерію Манна-Уїтні, що використовується для оцінки відмінностей між двома вибірками за рівнем будь-якої ознаки, виміряного якісно, отримано, що проведені імітаційні розрахунки є адекватними.

Л і т е р а т у р а

1. Акулиничев В.М. и др. Математические методы в эксплуатации железных дорог. М. Транспорт, 1981, – 224с.
2. Левин Д.Ю. Оптимизация потоков поездов. – М.: Транспорт, 1988. – 175 с.
3. Моделирование транспортных систем. Персианов В.А., Скалов К.Ю., Усков Н.С., М-изд-во «Транспорт» 1992г., – 209 с.
4. Расчет и оптимизация транспортных систем с использованием моделей (теоретические основы, методология): Автореф. дис...д-ра. техн. наук: 05.22.08/А.Э.Александров; УрГУПС. – Екатеринбург, 2008. – 50 с.
5. Harvey M. Wagner, Principles of Operations Research, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1969
6. Philip M. Morse, George E. Kimball, Methods of Operations Research, New York, MIT Press and John Wiley & Sons, 1951
7. L. V. Kantorovich, "Mathematical Methods of Organizing and Planning Production" Management Science, 4, 1960, 266–422.
8. Taha H. A. (An Introduction to Operations Research). – Macmillan, 1971.
9. Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2006). Numerical methods for engineers. Boston: McGraw-Hill.
10. Sokolowski, J. A., & Banks, C. M. (2009). Principles of modeling and simulation: A multidisciplinary approach. Hoboken, N.J.: John Wiley.
11. Parkinson T., Fisher I. Rail transit capacity. – Transportation Research Board, 1996. – Т. 13.

R e f e r e n c e s

1. Akulinichev V.M. i dr. Matematicheskie metody v jekspluatácii zheleznyh dorog. M. Transport, 1981, – 224s.
2. Levin D.Ju. Optimizacija potokov poezdov. – M.: Transport, 1988. – 175 s.
3. Modelirovanie transportnyh sistem. Persianov V.A., Skalov K.Ju., Uskov N.S., M-izd-vo «Transport» 1992g., – 209 s.
4. Raschet i optimizacija transportnyh sistem s ispol'zovaniem modelej (teoreticheskie osnovy, metodologija): Avtoref. dis...d-ra. tehn. nauk: 05.22.08/A.Je.Aleksandrov; UrGUPS. – Ekaterinburg, 2008. – 50 s.
5. Harvey M. Wagner, Principles of Operations Research, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1969
6. Philip M. Morse, George E. Kimball, Methods of Operations Research, New York, MIT Press and John Wiley & Sons, 1951
7. L. V. Kantorovich, "Mathematical Methods of Organizing and Planning Production" Management Science, 4, 1960, 266–422.
8. Taha H. A. (An Introduction to Operations Research). – Macmillan, 1971.

9. Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2006). Numerical methods for engineers. Boston: McGraw-Hill.
10. Sokolowski, J. A., & Banks, C. M. (2009). Principles of modeling and simulation: A multidisciplinary approach. Hoboken, N.J.: John Wiley.
11. Parkinson T., Fisher I. Rail transit capacity. – Transportation Research Board, 1996. – Т. 13.

Роговой А.С., Хорошилов Д.В. Использование методов имитационного моделирования для расчета пропускной способности железнодорожных станций.

В статье приведены результаты расчета пропускной способности железнодорожной станции на основе методов имитационного моделирования и линейного программирования на примере моделирования железнодорожного пересечения. Проанализированы методы, используемые для моделирования транспортных систем: аналитический, теория массового обслуживания, графический метод и имитационное моделирование. Проверена адекватность полученных результатов с помощью U-критерия Манна-Уитни. Результаты расчетов показали, что самый точный результат дает имитационное моделирование, а аналитическая формула, наиболее часто используемая при расчетах, имеет погрешность до 90 процентов. Аналитическая формула основывается на вероятностном подходе подсчета длительности задержек подвижного состава на пересечениях. Погрешность расчета по аналитической формуле увеличивается при увеличении пропуска поездов.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, линейное программирование, имитационная модель, пропускная способность, железнодорожная станция.

Rogovoy A.S., Horoshilov D.V. Use of simulation modeling methods for calculation of railway stations capacity.

In article results of calculation of railway stations capacity on the basis of simulation modeling methods on an example of railway crossing modeling are resulted. The methods used for transport systems modeling are analysed: analytical, the queuing theory, the graphic method and simulation modeling. Adequacy of the received results by means of Mann-Whitney U-test is checked up. Results of calculations have shown that the most exact result is given by simulation modeling, and the analytical expression most often used at calculations, has an error to 90 percent. The analytical expression is based on the probabilistic approach of calculation of delays duration of a rolling stock on crossings. The calculation error under the analytical expression increases at increase in the admission of trains.

Keywords: a railway traffic, linear programming, simulation model, railway station capacity.

Роговий А.С. – к.т.н., доцент кафедри «Теоретична механіка і гідравліка», ХНАДУ, м. Харків, Україна, e-mail: asrogovoy@ukr.net

Хорошилов Д.В. – студент кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті», СХУ ім. В.Далія, м. Северодонецьк, Україна.

Рецензент: д.т.н., проф. Чернецька - Білецька Н.Б.