

УДК 656.254.5

УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОТИ СОРТУВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ І ДІЛЬНИЦІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОЛЬОРОВИХ МЕРЕЖ ПЕТРІ

Кандидати техн. наук П. В. Долгополов, Т. В. Головко, В. В. Кулешов,
асп. П. Р. Пелех

IMPROVEMENT OF THE MARSHALLING YARD AND RAILWAY SECTION WORK USING COLORED PETRI NETWORKS

PhD (Tech.) P. Dolgoplov, PhD (Tech.) T. Golovko, PhD (Tech.) V. Kuleshov,
postgraduate student P. Pelekh

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352079>



Анотація. Побудовано математичну модель забезпечення поїздів локомотивами на основі кольорових мереж Петрі, яка враховує нерівномірність перевізного процесу і різномірність транспортних об'єктів і допомагає спрогнозувати критичні ситуації зростання черги вантажних поїздів на сортувальних станціях. Реалізація моделі на автоматизованих робочих місцях оперативно-диспетчерського персоналу дасть змогу вчасно розробляти регулювальні міри з метою недопущення утворення черги вантажних поїздів.

Ключові слова: сортувальна станція, черга поїздів, імітаційна модель, мережа Петрі, інтенсивність, локомотиви, поїзний диспетчер.

Abstract. To determine the operational parameters of the marshalling yards and railway section under conditions of unevenness, a mathematical model in terms of colored Petri nets was built, which allows taking into account the unevenness of the transportation process and the heterogeneity of transport objects in the «marshalling yard - railway section» system. The model makes it possible to predict in advance critical situations in providing freight trains with locomotives at marshalling yards.

The model simulates a system where passenger and freight trains are served by the same fleet of locomotives. The modeling results make it possible to obtain the parameters of the train queue at marshalling yards from variable input parameters.

Diagram of the dependences of the total number of freight train trains in queues at marshalling yards on the intensity of the train flow and the number of train locomotives operating in the system were constructed. The diagram shows that too intense a train flow with an insufficient number of locomotives leads to a sharp increase in the queue of trains waiting for locomotives, which is the cause of significant downtime. This leads to a decrease in the speed of cargo delivery and a decrease in the efficiency of transportation in general.

The implementation of the proposed model on automated workplaces of operational dispatch personnel as an intelligent module will allow train, shunting and locomotive dispatchers to timely identify conflict situations in the provision of freight trains with locomotives, as well as to develop and implement measures for the sequence of train disassembling and assembling, adjustment of the freight train schedule and the locomotive delivery schedule.

Keywords: *marshalling yard, train queue, simulation model, Petri net, intensity, locomotives, train traffic dispatcher.*

Вступ. Одним з основних напрямів організації ефективного перевізного процесу на залізничному транспорті є здійснення заходів, спрямованих на усунення конфліктів у просуванні вагонопотоків. При цьому дуже важливою умовою ефективного функціонування залізниці є відповідність кількості призначених поїздів можливостям залізничної інфраструктури і ресурсам локомотивного господарства. Недотримання цього балансу може призвести до серйозних затримок перевізного процесу, збільшення витрат і навіть аварійних ситуацій.

Рух поїздів не можна розглядати окремо від експлуатації залізничної інфраструктури, зокрема локомотивів, колійних парків станцій і їхніх експлуатаційних можливостей. І навіть якщо колійний розвиток і системи автоматики дають змогу пропустити певну кількість поїздів, треба розуміти, що це не має значення за умов недостатньої кількості локомотивів у депо або їх неготовності для експлуатації з технічних причин.

Аналіз досліджень і публікацій. У роботі [1] розроблена системно-теоретична модель процесів і аварій в управлінні залізничним транспортом. Вона визначає структуру, учасників і механізми управління безпекою, що складають адаптивну функцію зворотного зв'язку. Зроблено висновки про удосконалення конкретних механізмів зворотного зв'язку для ефективності впливу. Але ця модель не враховує ризики від перенасиченості залізничних дільниць і станцій рухомим складом, що особливо важливо в умовах

недостатньої кількості локомотивів і в періоди «вікон».

У роботі [2] доведено, що традиційні математичні методи вже не прийнятні для моделювання систем перевезень, які стали містити багато складних підсистем і мають значний вплив ефекту емерджентності. Запропоновано технологію мультиагентного моделювання, яка імітує взаємозв'язок між поведінкою і продуктивністю компонентів залізничної системи. Результати моделювання довели практичність методу, але в роботі не приділено достатньо уваги забезпеченню поїздів локомотивами на технічних станціях.

У роботі [3] розроблено метод моделювання поширення затримок поїздів на полігонах на основі модифікованих епідеміологічних моделей. Ураховано взаємний вплив поїздів із різними пріоритетами в потоці. Для моделювання застосовано алгоритм перетворення графа мережі на орієнтоване дерево, коренем якого є станція, де виникає затримка. Але в роботі не враховані обмеження, пов'язані з обмеженням технічних пристроїв утримувати чергу поїздів, які не можуть бути відправлені через нестачу локомотивів.

У роботі [4] розроблена модель місцевої роботи сортувальної станції на основі математичного апарату кольорових мереж Петрі. Результати показали, що середня довжина черги вагонів в очікуванні подавання залежить від середнього часу виконання операцій локомотивом і дисперсії цього часу. Тобто нестабільність тривалості операцій може мати вплив більш негативний, ніж нестача локомотивів. Але ці дослідження присвячені тільки місцевій роботі станцій і не стосуються дільниць.

У роботі [5] розроблена модель оптимізації інтервалу між поїздами в умовах обмежених тягових ресурсів і пропускної спроможності станцій і вантажних пунктів. Розв'язання моделі дає змогу знайти баланс між витратами на переміщення поїздопотоків із різних дільниць і витратами вантажовласників з урахуванням обмежень логістичного ланцюга. Але в роботі не врахована пріоритетність пасажирських поїздів у наданні локомотивів.

У роботі [6] розроблена оптимізаційна модель, яка включає правила динамічного пріоритету диспетчерської роботи залізничної дільниці з обмеженою пропускною спроможністю. Цей підхід має переваги для швидкого створення практичних рішень порівняно з комерційним програмним забезпеченням для оптимізації. Але в моделі не враховані важливі експлуатаційні фактори, такі як обмеження експлуатованого парку локомотивів у локомотивних депо та інші.

У роботі [7] розроблено дискретно-подійну імітаційну модель руху пасажирів і поїздів. Модель включає складні алгоритми, що підвищують деталізацію поведінки агентів. На основі схеми станції розроблено імітаційну модель для оцінювання адекватності запропонованих рішень. Але результати цих досліджень направлені на вирішення питань ліквідації конфліктних ситуацій у моделях, орієнтованих на пасажирські перевезення.

У роботі [8] розроблено модель оптимізації поїздопотоків у просторово-часовій мережі з кількома роздільними спроможностями через поєднання безконфліктних обмежень маршрутизації з процесом планування поїздів зі зворотним зв'язком. Ця модель заслуговує на увагу, тому що вона не потребує оптимізаційних розв'язувачів. Але разом із тим вона не враховує насиченість залізничних дільниць пасажирськими поїздами, через що може бути вичерпана їхня наявна пропускна спроможність, що не дасть змогу просувати

задані вантажопотоки з належною швидкістю.

У роботі [9] проаналізовані сучасні експлуатаційні параметри і вузькі місця системи інтермодального руху і запропоновані заходи з забезпечення зростання його обсягів і покращення сталості. Зроблено висновки про сталу сегментацію ринків інтермодальних перевезень у контексті глобальних ланцюгів поставок. Але не були враховані деякі практичні фактори виробництва, одним із яких є дефіцит рухомого складу і недосконале його використання через наявність простоїв на станціях формування поїздів.

У роботі [10] здійснено навчання моделей машинного навчання з учителем на основі алгоритмів класифікації для прогнозування часу затримок у залізничних перевезеннях. Досліджено, що основними параметрами прогнозування затримок є вага і довжина поїзда, відстань між станціями, місяць експлуатації та інші. Виявлено залежність збільшення кількості затримок від збільшення довжини поїздів. Але в роботі не відображено вплив на затримки таких факторів, як насичення залізничних дільниць поїздами і прискорення операцій через дефіцит рухомого складу.

У роботі [11] вирішено завдання визначення раціонального розподілу поїздопотоків на основі математичного апарата теорії графів із застосуванням алгоритму Форда-Фалкерсона. Модель регулювання поїздопотоків із масовим швидкісним рухом допомагає оптимізувати маршрути прямування поїздів в умовах скорочення пропускної спроможності окремих дільниць у періоди вимушених перерв у їхній роботі. Але в роботі не досліджено вплив змінних факторів на зростання черги поїздів у разі нестачі локомотивів на станціях.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є визначення експлуатаційних параметрів роботи сортувальної станції і залізничної дільниці в умовах нерівномірностей на основі імітаційного

моделювання для оперативного прогнозування критичних ситуацій у забезпеченні поїздів локомотивами для вчасного вжиття регулювальних заходів із недопущення появи черги поїздів.

Для реалізації цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- удосконалити методику визначення кількості об'єктів інфраструктури станції для обробки поїздів на основі імітаційного моделювання і реальному масштабі часу;
- побудувати математичну модель, що враховує нерівномірність перевізного процесу і різномірність транспортних об'єктів на сортувальній станції і дільниці;
- отримати параметри черги составів поїздів на станціях від змінних вхідних параметрів і запропонувати заходи зі скорочення черги поїздів.

Основна частина дослідження. Для досягнення стабільності в перевізному процесі на залізничних напрямках необхідне системне планування, у якому враховані такі фактори: наявна пропускна і провізна спроможність дільниць і переробна спроможність станцій, наявність і готовність локомотивів у депо, розклад поїздів і їх узгодження з можливостями інфраструктури, потрібні обсяги перевезень, резерви для позаштатних ситуацій.

Неузгодженість цих факторів з організацією поїздопотоків стає причиною або омертвіння цінних активів, або зростання черг поїздів на залізничних напрямках і зменшення швидкості доставлення вантажів.

Для розрахунку кількості об'єктів інфраструктури залізничної технічної станції (локомотивів, колій у парках, працівників станцій тощо) для обробки певної кількості поїздів, які поступають у відповідну залізничну систему, за теорією ймовірностей, для загальних досліджень можна використовувати цілий ряд формул, наприклад формулу Ерланга

$$N_{об} = \frac{\lambda_n \cdot t_{обсл}}{3600}, \quad (1)$$

де λ_n – інтенсивність потрапляння поїздів у систему «сортувальна станція – залізнична дільниця»;

$t_{обсл}$ – тривалість обслуговування поїзда одним локомотивом,

$$t_{обсл} = t_{уч} + t_{приц} + t_{отц}, \quad (2)$$

де $t_{уч}$ – середня тривалість прямуювання поїзда по дільниці в одному напрямку, включаючи зупинки на проміжних станціях;

$t_{приц}$, $t_{отц}$ – тривалість знаходження локомотива із составом на станціях відповідно причеплення і відчеплення (опробування автогальм, отримання поїзних документів, маневри під состав і з-під состава тощо).

Але загальним недоліком виразів, про які ідеться, вважають тільки усереднені параметри тривалості обслуговування поїзда і кількість поїздів, що поступають у систему.

Такі самі недоліки характерні і для формул, що визначають середню довжину черги, наприклад формула Полячека-Хінчіна

$$N^{оч} = \frac{\rho_{cy}^2 \cdot (1 + \nu(t_{обсл})^2)}{2 \cdot (1 - \rho)}, \quad (3)$$

де ρ_{cy} – коефіцієнт завантаження системи, що розглядають;

$\nu(t_{обсл})$ – коефіцієнт варіації випадкової величини $t_{обсл}$.

$$\rho_{cy} = \frac{\overline{t_{обсл}}}{\nu}, \quad (4)$$

$$\nu(t_{обсл})^2 = \frac{D_{t_{обсл}}}{\overline{t_{обсл}}^2}. \quad (5)$$

Залізничний перевізний процес має значну нерівномірність поїздопотоків та інших факторів впливу. І кожна оперативна зміна і навіть година є особливою.

Включення середніх значень для моделювання може призвести до затримок. Для більшої відповідності реальним факторам в умовах коливань доцільно використати імітаційні методи математичного моделювання для можливості передбачення конфліктних ситуацій і заздалегідь виробляти шляхи їх вирішення.

Одним із математичних апаратів, що допомагає врахувати нерівномірність перевезень і різномірність транспортних об'єктів, є кольорові мережі Петрі, перевагою яких є те, що в них можна окремо надавати відповідний колір міткам, які відповідають різномірним рухомих об'єктам: поїздам, локомотивам, вагонам тощо. Також кольори мають переходи і позиції, які відповідають об'єктам інфраструктури, що призначені для обслуговування різномірних рухомих об'єктів.

Так, для визначення експлуатаційних параметрів роботи сортувальної станції

побудовано математичну модель, яку подано на рис. 1. Ця модель побудована за допомогою програмного продукту «CPN IDE». Модель моделює систему, коли пасажирські і вантажні поїзди обслуговує один і той самий парк локомотивів, приписаних до основного депо, що розташоване на станції 1 (позиція «Locomotives in depot 1», яка відповідає кількості локомотивів у цьому депо). Обороти локомотивів здійснюється на станції 2 (позиція «Locomotives under turnover»).

Міткам, позиціям і переходам у моделі присвоєно такі кольори:

- червоний – пасажирські поїзди і пристрої їх обслуговування;
- синій – пасажирські поїзди і пристрої їх обслуговування;
- зелений – поїзні локомотиви;
- чорний – службові дуги для коректної роботи моделі.

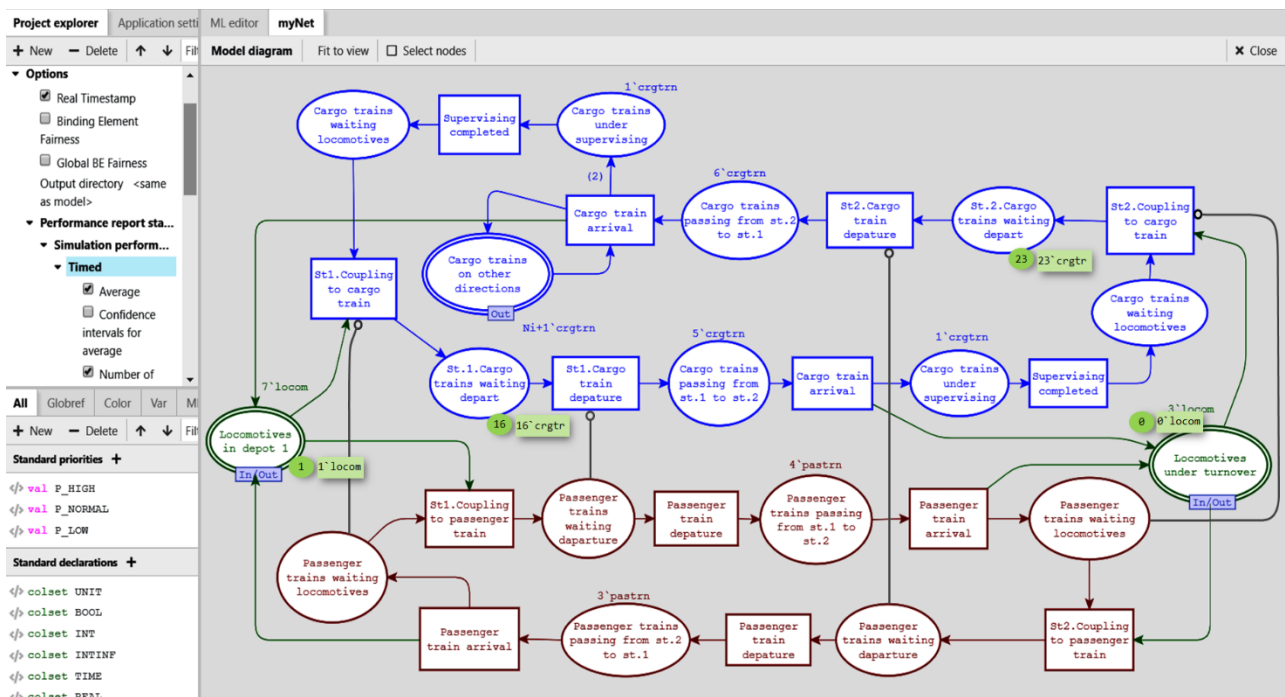


Рис. 1. Моделювання обслуговування поїздів у системі «сортувальна станція – залізнична дільниця»

Розберемо модель детально. Наявності вантажних поїздів на підходах до станції 1 відповідає перехід «Cargo trains passing from st.2 to st.1», прибуттю – перехід «Cargo train arrival», причому відчепленню локомотива відповідає зелена дуга, яка веде до позиції «Locomotives in depot 1». Інші позиції і переходи відповідають таким станам і подіям із вантажними поїздами на станції 1:

- «Cargo trains under supervising» – вантажні поїзди проходять обслуговування після прибуття і відправлення на станції;
- «Supervising completed» – обслуговування состава вантажного поїзда після прибуття і відправлення на станції завершено;
- «Cargo trains waiting locomotives» – состав вантажного поїзда знаходиться в очікуванні поїзного локомотива;
- «St1.Coupling to cargo train» – причеплення поїзного локомотива до состава вантажного поїзда;
- «St1.Cargo trains waiting depart» – вантажний поїзд знаходиться в очікуванні відправлення;

- «St1.Cargo trains departure» – відправлення вантажного поїзда.

Червоні позиції і переходи моделюють стани і події, що відповідають технології обслуговування пасажирських поїздів. Інгібіторні дуги реалізують пріоритетність обслуговування пасажирських поїздів перед вантажними.

Технологію роботи з поїздами на станції 2 відтворюють аналогічні позиції і переходи у правій частині моделі.

Надходження кожного поїзда в систему «сортувальна станція – залізнична дільниця» модель супроводжує появою відповідної роботи, пов'язаної з обслуговуванням поїзда. Оскільки перший інтервал між поїздами починається одразу після періоду простою (система вільна), то перший поїзд потрапляє на обслуговування, а наступні – у чергу. Тому черга на інтервалі, попередньому першому і розміщеному в періоді простою, $N_n^{oc} = 0$. Звідси для визначення черги з поїздів, що очікують обслуговування, доцільно використовувати вираз

$$N_i^{oc} = \begin{cases} N_{i-1}^{oc}(t_{обсл}) + N_i^{nриб}(t_{обсл}) - 1, & \text{при } N_{i-1}^{oc}(t_{обсл}) \cup N_i^{nриб}(t_{обсл}) \neq 0; \\ 0, & \text{при } N_{i-1}^{oc}(t_{обсл}) = N_i^{nриб}(t_{обсл}) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Початковими даними для моделювання є кількість міток «локомотиви» у зелених позиціях, які прийняті такими: $M_{лок}^{cm1} = 7$ шт., $M_{лок}^{cm2} = 3$ шт. На кожному i -му кроці моделювання до системи поступає новий поїзд з інших підходів, навантажуючи систему. Загальна кількість поїздів у системі становить $N_i + 1$. Із досягненням обмежень черги модель збільшує $M_{лок}^{cm1}$ на 1.

Результати моделювання дають змогу отримати параметри черги составів поїздів на технічних станціях N_n^{oc} від кількості

поїздів N_n і локомотивів $M_{лок}$, що знаходяться в системі «сортувальна станція – залізнична дільниця», Із рис. 2 видно, що якщо $M_{лок} = 10$ шт., то середня величина черги по станції 1 $N_n^{oc1} = 3,8$ состава, а по станції 2 $N_n^{oc2} = 5,1$ состава. При цьому максимальна величина черг відповідно становить $N_{max}^{oc1} = 16$ і $N_{max}^{oc2} = 23$ состави. Результати свідчать про те, що зростання черги составів на станції обороту локомотивів здійснюється на 43,7 % швидше, ніж на станції основного депо.


```

State Space Analysis:
-----
- Total nodes: 17
- Total arcs: 42
- Dead markings: 0
- Live transitions: 14/14
- Strongly connected components (SSC): 1
  - Max tokens in place "Locomotives in depot 1": 7
  - Max tokens in place "Locomotives under turnover": 3
  - Max tokens in place "St.1.Cargo trains waiting depart": 16
  - Max tokens in place "St.2.Cargo trains waiting depart": 23

Reachability Analysis:
-----
- All markings are reachable.
- Initial marking: [Locomotives in depot 7: 2, Locomotives under turnover: 7, ...]
- Final marking: [Locomotives in depot 1: 2, Locomotives under turnover: 0, ...]

Liveness Analysis:
-----
- No dead transitions detected.
- All transitions are live.
- Transition "St1.Cargo train departure" fired: 72 times.
- Transition "St2.Cargo train departure" fired: 81 times.

Fairness Analysis:
-----
- Transition "St1.Cargo train departure: Impartial
- Transition "St2.Cargo train departure: Impartial
- Transition "St1.Coupling to cargo train": Impartial.
- Transition "St2.Coupling to cargo train": Impartial.

Performance Metrics:
-----
- Average tokens in "Locomotives in depot 1": 2.7
- Average tokens in "Locomotives under turnover ": 1.3
- Average tokens in "St.1.Cargo trains waiting depart": 3.8
- Average tokens in "St.2.Cargo trains waiting depart": 5.1
- Average processing time: 1.12 hours
- Locomotives utilization: 78.3%.

Invariant Checks:
-----
- Place invariant for "Locomotives in depot 1": PASSED (sum of tokens = 7)
- Place invariant for "Locomotives under turnover ": PASSED (sum of tokens = 3)
- Place invariant for "St.1.Cargo trains waiting depart": PASSED (sum of tokens = 156)
- Place invariant for "St.2.Cargo trains waiting depart": PASSED (sum of tokens = 138)
- Transition Invariant for "St1.Cargo train departure": PASSED
- Transition Invariant for "St2.Cargo train departure": PASSED

Simulation Time:
-----
- Total simulation time: 240 hours (10 days)
- Time to explore state space:

```

Рис. 2. Результати моделювання обслуговування поїздів у системі «сортувальна станція – залізнична дільниця»

На основі отриманих даних за допомогою програмного продукту Scilab побудовано діаграми залежностей загальної кількості составів вантажних поїздів у чергах на технічних станціях N_n^{oc} від двох факторів: інтенсивності потрапляння поїздів у систему λ_n і кількості поїзних локомотивів у цій системі $M_{лок.}$ (рис. 3).

Отримані залежності вказують на параболічну залежність між вказаними

експлуатаційними параметрами. Це означає, що занадто інтенсивний потік поїздів, що потрапляє в систему, за недостатньої кількості локомотивів призводить до різкого зростання черги составів в очікуванні локомотивів, що стає причиною значних простоїв у перевізному процесі. Це веде до зменшення швидкості доставлення вантажів і зниження ефективності перевезень у цілому.

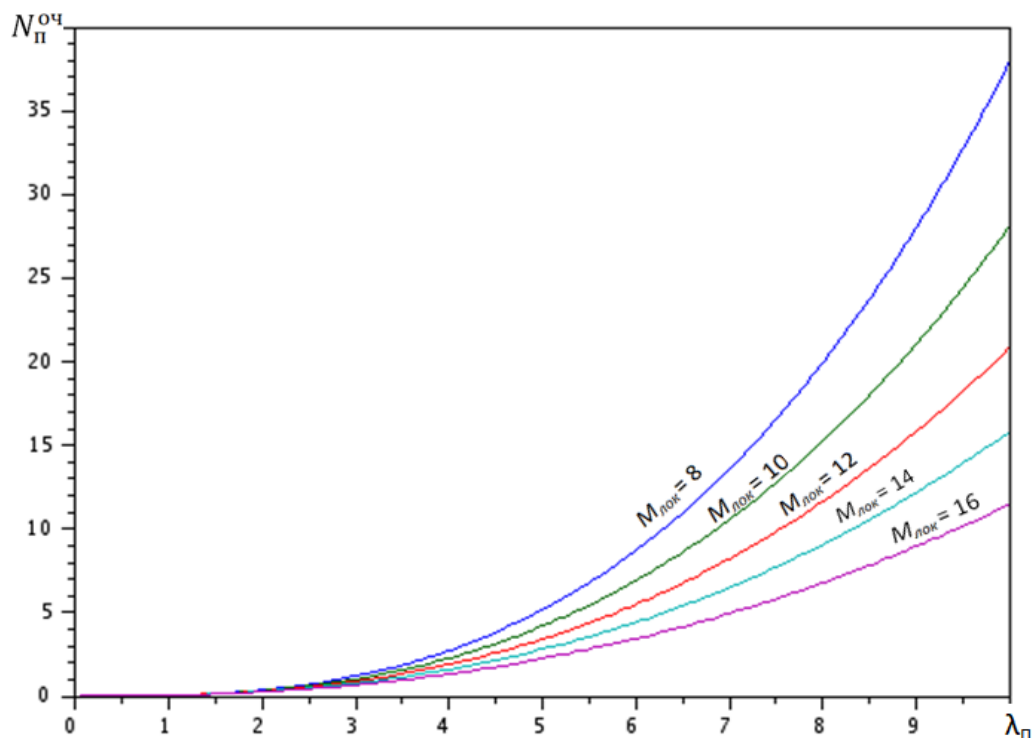


Рис. 3. Діаграма залежностей величини загальної черги составів у системі «сортувальна станція – залізнична дільниця»

Вочевидь, застосування імітаційного моделювання технологічних процесів в умовах сучасних технічних можливостей і розвитку математичних методів, зокрема кольорових мереж Петрі, дає змогу заздалегідь передбачати випадки невідповідності переробної спроможності інфраструктури потребам перевізного процесу. Моделювання може адекватно виявити критичні ситуації із забезпечення вантажних поїздів локомотивами на станціях, що можуть трапитися впродовж поточної або навіть наступної доби.

Основними користувачами результатів моделювання є поїзні (ДНЦ) і маневрові (ДСЦ) диспетчери, які оперативно регулюють поїздоутворення на сортувальних станціях, а також локомотивний диспетчер (ДГПЛ), який планує забезпечення поїздів локомотивами.

Висновки. Удосконалено методику визначення кількості об'єктів

інфраструктури залізничної технічної станції для обробки певної кількості поїздів, які поступають у відповідну залізничну систему, на основі імітаційного моделювання в реальному масштабі часу.

Для визначення експлуатаційних параметрів роботи сортувальної станції і залізничної дільниці в умовах нерівномірностей побудовано математичну модель у термінах кольорових мереж Петрі, яка допомагає врахувати нерівномірність перевізного процесу і різномірність транспортних об'єктів у системі «сортувальна станція – залізнична дільниця». Модель дає змогу заздалегідь передбачати критичні ситуації із забезпечення вантажних поїздів локомотивами на сортувальних станціях

Результати моделювання дають змогу отримати параметри черги составів поїздів на сортувальних станціях $N_n^{оч}$, залежні від

кількості поїздів N_n і локомотивів $M_{лок}$, що знаходяться в системі.

Побудовано діаграми залежностей загальної кількості составів вантажних поїздів у чергах на сортувальних станціях $N_n^{оч}$ від інтенсивності потрапляння поїздів у систему λ_n і кількості поїзних локомотивів $M_{лок}$. Залежності показують, що занадто інтенсивний поїздопотік, що потрапляє в систему, за недостатньої кількості локомотивів веде до різкого зростання черги

составів в очікуванні локомотивів, а це є причиною значних простоїв.

Реалізація запропонованої моделі і на автоматизованих робочих місцях ДНЦ, ДСЦ і ДГПЛ як інтелектуального модуля допоможе працівникам вчасно розробляти і вживати заходів із послідовності розформування і формування поїздів, корегування ниток графіків руху вантажних поїздів і видачі локомотивів із метою недопущення утворення черги вантажних поїздів на станціях.

Список використаних джерел

1. Read G. J. M., Naweed A. & Salmon P. M. (2019). Complexity on the rails: A systems-based approach to understanding safety management in rail transport. *Reliability Engineering & System Safety*. 188. 352–365. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.038>.
2. Kou L., Fan W. & Song S. Multi-agent-based modelling and simulation of high-speed train. *Computers & Electrical Engineering*. 2020. 86. 106744. doi:10.1016/j.compeleceng.2020.106744.
3. Gurin D., Prokhorchenko A., Kravchenko M., Shapoval G. Development of a method for modelling delay propagation in railway networks using epidemiological SIR models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3, № 3(108). P. 6-13. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.219285>.
4. Формування моделі технологічного процесу підсистеми місцевої роботи сортувальної станції із застосуванням математичного апарату кольорових мереж Петрі / В. С. Сергєєв, В. М. Прохоров, Т. Ю. Калашнікова та ін. *Збірник наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2025. Вип. 211. С. 304-315. doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327287>.
5. Butko T., Muzykin M., Prokhorchenko A., Prokhorchenko H. Determining the rational motion intensity of train traffic flows on the railway corridors with account for balance of expenses on traction resources and cargo owners. *Transport and Telecommunication*. Riga, Litvia. 2019. Vol. 20 (3). P. 215-228. doi: <https://doi.org/10.2478/ttj-2019-0018>.
6. Shakibayifar M., Sheikholeslami A. & Corman F. A simulation-based optimization approach to reschedule train traffic in uncertain conditions during disruptions. *Scientia Iranica*. 2017. 25(2). 4186. doi:10.24200/sci.2017.4186.
7. Kuzmin D., Baginova V. & Ageikin A. Discrete event simulation model of the railway station. *Transportation Research Procedia*. 2022. 63. 929–937. doi:10.1016/j.trpro.2022.11.091.
8. Wang E., Yang L., Li P., Zhang C., Gao Z. Joint optimization of train scheduling and routing in a coupled multi-resolution space-time railway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2022. Vol. 147. 103994. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103994>.
9. Wagener N., Aritua B., Zhu T. The New Silk Road: Opportunities for Global Supply Chains and Challenges for Further Development. LogForum. *Scientific Journal of Logistics*. 2020. Vol. 16 (2). P. 193-207. URL: <http://doi.org/10.17270/J.LOG.2020.403>.
10. Pineda-Jaramillo J., Viti F. Identifying the rail operating features associated to intermodal freight rail operation delays. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2022. 147. 103993. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103993>.

11. Долгополов П. В., Трегубчак Д. В. Удосконалення організації поїздопотоків на залізничному полігоні в умовах швидкісного руху. *Збірник наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. 163. С. 25-30. URL: https://kart.edu.ua/wpcontent/uploads/2020/06/tht_zbirn_163.pdf.

Долгополов Петро Віталійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2166-8064>. E-mail: osnova2017@gmail.com.

Головко Тетяна Владиславна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7977-9664>. E-mail: golovko_tv@kart.edu.ua.

Кулешов Валерій В'ячеславович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничних станцій і вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1757-0336>. E-mail: kuleshov@kart.edu.ua.

Пелех Павло Романович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0008-3565-7391>. E-mail: ppavlo@gmail.com.

Dolgoplov Peter, PhD (Tech), Associate Professor, department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2166-8064>. E-mail: osnova2017@gmail.com.
Golovko Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7977-9664>. E-mail: golovko_tv@kart.edu.ua.
Kuleshov Valerii, PhD (Tech), Associate Professor, department of Railway Stations and Junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1757-0336>. E-mail: kuleshov@kart.edu.ua.
Pelexh Pavlo, PhD student, department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0008-3565-7391>. E-mail: ppavlo@gmail.com.

Статтю прийнято 15.12.2025 р.