

УДК 656.2

ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПІДСИСТЕМИ МІСЦЕВОЇ РОБОТИ СОРТУВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ КОЛЬОРОВИХ МЕРЕЖ ПЕТРІ

Асп. В. С. Сергєєв, кандидати техн. наук В. М. Прохоров, Т. Ю. Калашнікова, О. Е. Шандер, Т. В. Головко

FORMATION OF A TECHNOLOGICAL PROCESS MODEL FOR THE LOCAL OPERATIONS SUBSYSTEM OF A MARSHALLING YARD STATION USING THE MATHEMATICAL APPARATUS OF COLOURED PETRI NETS

Postgraduate student V. Serhieiev, PhD (Tech) V. Prokhorov, PhD (Tech) T. Kalashnikova, PhD (Tech) O. Shander, PhD (Tech) T. Golovko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327287>



Анотація. У статті розглянуто формування моделі технологічного процесу підсистеми місцевої роботи сортувальної станції з використанням математичного апарату кольорових мереж Петрі (CPN Tools). Основну увагу приділено оцінюванню ефективності цього підходу для моделювання складних динамічних процесів, характерних для роботи залізничних станцій.

Кольорові мережі Петрі дають змогу не лише диференціювати об'єкти різних типів за допомогою кольорових фішок, а й моделювати часові аспекти процесів із використанням різних статистичних розподілів, зокрема експоненційного, нормального та розподілу Ерланга. Це підвищує гнучкість і точність моделі.

Результати моделювання показують, що середня довжина черги вагонів, які очікують на подавання, залежить не лише від середнього часу виконання операцій маневровим локомотивом, але і дисперсії цього часу. Очікуваним є те, що збільшення середнього часу операцій веде до зростання черги. Однак менш очевидним є вплив дисперсії: підвищена волатильність порушує ритмічність процесу, створює «вузькі позиції» і спричиняє накопичення затримок у системі.

Цей висновок свідчить про те, що нестабільність у тривалості операцій може мати значно негативний вплив, ніж навіть нестача маневрових потужностей. Урахування цього чинника є критично важливим для ефективного планування роботи технічних залізничних станцій. Крім того, отримані результати підкреслюють, що не лише оперативне планування, а й точність реалізації операцій на практиці відіграють вирішальну роль у продуктивності системи.

Важливо, що подібний аналіз був би складним без використання кольорових мереж Петрі, які дають змогу моделювати складні взаємодії між різними типами об'єктів (локомотивами, вагонами, коліями) і враховувати часові характеристики процесів. Це підтверджує ефективність CPN Tools як потужного інструменту для аналізу та оптимізації технологічних процесів у залізничних системах.

Ключові слова: кольорові мережі Петрі, CPN Tools, моделювання технологічних процесів, підсистема місцевої роботи.

Abstract. The article examines the formation of a technological process model for the local operations subsystem of a marshalling yard using the mathematical apparatus of Coloured Petri Nets

(CPN Tools). The primary focus is on evaluating the effectiveness of this approach in modeling complex dynamic processes characteristic of railway station operations.

Coloured Petri Nets not only allow differentiation of objects of various types using coloured tokens but also enable the modeling of temporal aspects of processes through different statistical distributions, including exponential, normal, and Erlang distributions. This enhances the flexibility and accuracy of the model.

Simulation results indicate that the average queue length of wagons awaiting dispatch depends not only on the mean duration of shunting locomotive operations but also on the variance of this duration. While it is expected that an increase in the mean operation time leads to longer queues, the impact of variance is less obvious. Increased volatility disrupts the rhythmicity of the process, creates bottlenecks, and causes the accumulation of delays in the system.

This finding suggests that instability in operation durations can have a significantly more negative impact than even a lack of shunting capacity. Considering this factor is critically important for effective planning of railway yard operations. Moreover, the results highlight that not only operational planning but also the precise execution of operations in practice plays a decisive role in system performance.

Notably, such an analysis would be challenging without the use of Coloured Petri Nets, which enable the modeling of complex interactions between different types of objects (locomotives, wagons, tracks) while accounting for the temporal characteristics of processes. This confirms the effectiveness of CPN Tools as a powerful instrument for analyzing and optimizing technological processes in railway systems.

Keywords: Coloured Petri Nets, CPN Tools, technological process modeling, local operations subsystem.

Постановка проблеми. Сучасні залізничні системи є складними динамічними об'єктами, які потребують ефективного управління для забезпечення безпеки, пунктуальності та економічної ефективності. Однією з основних проблем у процесі функціонування залізничних станцій є організація місцевої роботи, яка включає обслуговування місцевих вагонів, виконання маневрових операцій і взаємодію з іншими підсистемами, такими як сортувальні станції. Незважаючи на широке використання сучасних методів моделювання та оптимізації, існують значні труднощі у врахуванні всіх чинників, що впливають на ефективність роботи станцій.

Основним викликом є необхідність урахування динамічних змін у системі, таких як зміни інтенсивності руху поїздів, варіації часу виконання операцій і змінність оперативної обстановки. Крім того, сучасні моделі часто не враховують людський чинник, такі як помилки диспетчерів або операторів, що може призводити до значних

відхилень від запланованих показників. Це створює необхідність розроблення нових підходів для моделювання та оптимізації роботи залізничних станцій, що дає змогу враховувати як технічні, так і організаційні аспекти роботи системи.

Отже, актуальним є розроблення нових методів моделювання, щоб урахувати змінність оперативної обстановки та динамічні зміни в системі. Це включає використання сучасних підходів, таких як кольорові мережі Петрі, агентно-орієнтоване моделювання та симуляційна оптимізація, для більш точного відображення реальних умов роботи і розроблення ефективних стратегій управління. Це дасть змогу не лише підвищити ефективність роботи станцій, але й забезпечити більш стабільну та передбачувану роботу залізничних систем у цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1] запропоновано стохастичну модель динамічного розподілу

трафіка, що враховує випадкові тимчасові залежності попиту. Автори стверджують, що така модель забезпечує надійне вирішення завдання оптимізації системи, ураховуючи невизначеність і пропонуючи корисні стратегії управління. Однак моделі не враховують можливі зміни в поведінці користувачів, що може вплинути на результати в умовах реального часу.

У статті [2] запропоновано підхід для оптимізації розкладу руху поїздів за умов невизначеності під час порушень. Автори продемонстрували, як симуляційні методи можуть бути використані для ефективного планування, щоб зменшити затримки та покращити управління рухом. Однак модель не враховує соціально-економічні наслідки затримок, що може вплинути на загальну ефективність управління.

У статті [3] запропоновано новий підхід для моделювання та симуляції високошвидкісних поїздів за допомогою технології, базованій на мультиагентному моделюванні. Автори підкреслюють, що цей метод дає змогу ефективно досліджувати взаємозв'язки між індивідуальною поведінкою компонентів системи та їх загальною продуктивністю, що особливо актуально для складних систем високошвидкісного залізничного транспорту. Однак запропонована модель не враховує вплив зовнішніх чинників, таких як погодні умови або людський чинник, що може обмежити практичність застосування в реальних сценаріях.

У статті [4] розглянуто оптимізацію розкладу руху поїздів під час великих порушень, зокрема блокування колій. Автори розробили симуляційно-оптимізаційну модель, яка включає динамічні правила пріоритету для зменшення загального часу затримок поїздів. Результати дослідження вказують на істотні переваги запропонованого підходу порівняно з комерційним програмним забезпеченням, зокрема швидкість отримання практичних рішень і їхня точність, проте модель може не

враховувати специфічні локальні умови, які можуть вплинути на ефективність.

У статті [5] розглянуто моделювання роботи залізничного вокзалу за допомогою моделювання на основі систем дискретних подій. Автори розробили модель, яка дає змогу деталізувати поведінку агентів, зокрема алгоритми для прибуття поїздів та управління пасажиропотоками. Результати тестування моделі свідчать про ефективність запропонованих рішень, хоча зазначимо, що специфіка місцевих умов може вплинути на загальну адаптивність моделі.

У статті [6] запропоновано узагальнену модель симуляції руху поїздів на основі використання математичного апарату клітинних автоматів. Автори розглядають, як команди розкладу впливають на динаміку руху поїздів, підкреслюючи взаємозалежність між поїздами та управлінськими командами. Модель розбиває подорож на серію рухів по блоках з обмеженнями швидкості, реалізуючи динамічні оновлення швидкості, що відображує реалістичні корекції. Результати симуляцій демонструють, що модель може бути корисною для підвищення ефективності залізничної мережі. Проте слід зазначити, що складність моделі може потребувати значних обчислювальних ресурсів.

У статті [7] проаналізовано особливості роботи технічної станції в умовах необхідності зважування вагонів, з акцентуванням на технології обробки поїздів і статистичних даних про поїздопотоки. Досліджено стаціонарність роботи підсистем станції та запропоновано удосконалення сучасної методики, включаючи моделювання роботи станції як багатофазної системи масового обслуговування. Однак, незважаючи на детальний аналіз, недостатньо враховано можливі зовнішні чинники, які можуть впливати на ефективність роботи станції а також не наведено модель взаємодії підсистем технічної станції.

У статті [8] розглянуто умови посилення взаємодії між підсистемами технічної станції та прилеглими дільницями, що має на меті підвищення ефективності обробки поїздів і покращення координації між різними елементами системи. Пропоновано ряд заходів для оптимізації комунікаційних процесів, що дасть змогу зменшити затримки та покращити загальну продуктивність станції. Проте, незважаючи на позитивні аспекти, не враховано можливі ризики, пов'язані з впровадженням нових технологій взаємодії, які можуть потребувати значних інвестицій і часу на адаптацію персоналу. Крім того, відсутність оцінювання впливу змін на процеси, що вже відбуваються, може призвести до непередбачуваних ускладнень у роботі станції. Однак, незважаючи на детальний аналіз, недостатньо враховано можливі зовнішні чинники, які можуть впливати на ефективність роботи станції, такі як зміни в поїздопотоках чи технічні збої. Крім того, запропоновані методи удосконалення можуть потребувати додаткових ресурсів для реалізації, що не завжди може бути виправдано.

Отже, основними викликами є необхідність урахування динамічних змін у системі, таких як зміни інтенсивності руху поїздів, варіації часу виконання операцій і вплив зовнішніх чинників тощо.

Формулювання цілей. Метою дослідження є розроблення моделі для оптимізації роботи залізничних станцій, яка враховує мінливість оперативної обстановки та динамічні зміни в системі. Основне завдання полягає у створенні інструменту, що дає змогу ефективно планувати обслуговування місцевих вагонів, виконувати маневрові операції та мінімізувати час очікування. Для досягнення цієї мети необхідно вивчити сучасні підходи для моделювання та визначити оптимальні методи для врахування ключових чинників, що впливають на ефективність роботи станцій.

Викладення основного матеріалу дослідження. Кольорові мережі Петрі (англ. Colored Petri Nets, CPN) є потужним інструментом для моделювання складних технологічних процесів, зокрема в залізничних системах. Їхня перевага полягає в тому, що вони дають змогу враховувати різні типи (кольори) об'єктів (наприклад вагони, локомотиви, колії) і їхні взаємодії, що є основним для аналізу та оптимізації роботи залізничних станцій. Завдяки використанню кольорових фішок, які відображують різні типи даних, кольорові мережі Петрі дають змогу моделювати складні системи з високим рівнем деталізації.

Однією з головних переваг кольорових мереж Петрі є їхня здатність урахувувати паралельні процеси та часові затримки, що є критично важливим для моделювання залізничних операцій. Наприклад, одночасне обслуговування кількох поїздів або виконання маневрових операцій може бути ефективно відображено за допомогою кольорових мереж Петрі. Крім того, кольорові мережі Петрі дають змогу інтегрувати часові мітки та закони розподілу, що робить їх ідеальними для моделювання реальних умов, де час виконання операцій може варіюватися.

Ще однією важливою перевагою є наочність і структурованість моделей на основі кольорових мереж Петрі. Вони дають змогу візуалізувати складні процеси у вигляді графічних діаграм, що спрощує аналіз і комунікацію між фахівцями. Це особливо важливо для залізничних систем, де необхідно враховувати велику кількість взаємопов'язаних елементів. Отже, використання кольорових мереж Петрі для моделювання технологічних процесів у залізничних системах є обґрунтованим, оскільки вони дають змогу враховувати складні взаємодії, часові затримки та різні типи об'єктів, що робить їх ефективним інструментом для аналізу та оптимізації роботи залізничних станцій. CPN Tools [9] — це інструмент для моделювання та

аналізу кольорових мереж Петрі, за допомогою якого можна створювати моделі та симулювати процеси в них, що допомагає досліджувати складні системи, такі як програмне забезпечення, мережі чи бізнес-процеси. Інтерфейс CPN Tools графічний,

що робить його зручним для розуміння та роботи. Основна мета — аналіз поведінки систем і виявлення потенційних помилок. На рис. 1 наведений інтерфейс програми CPN Tools.

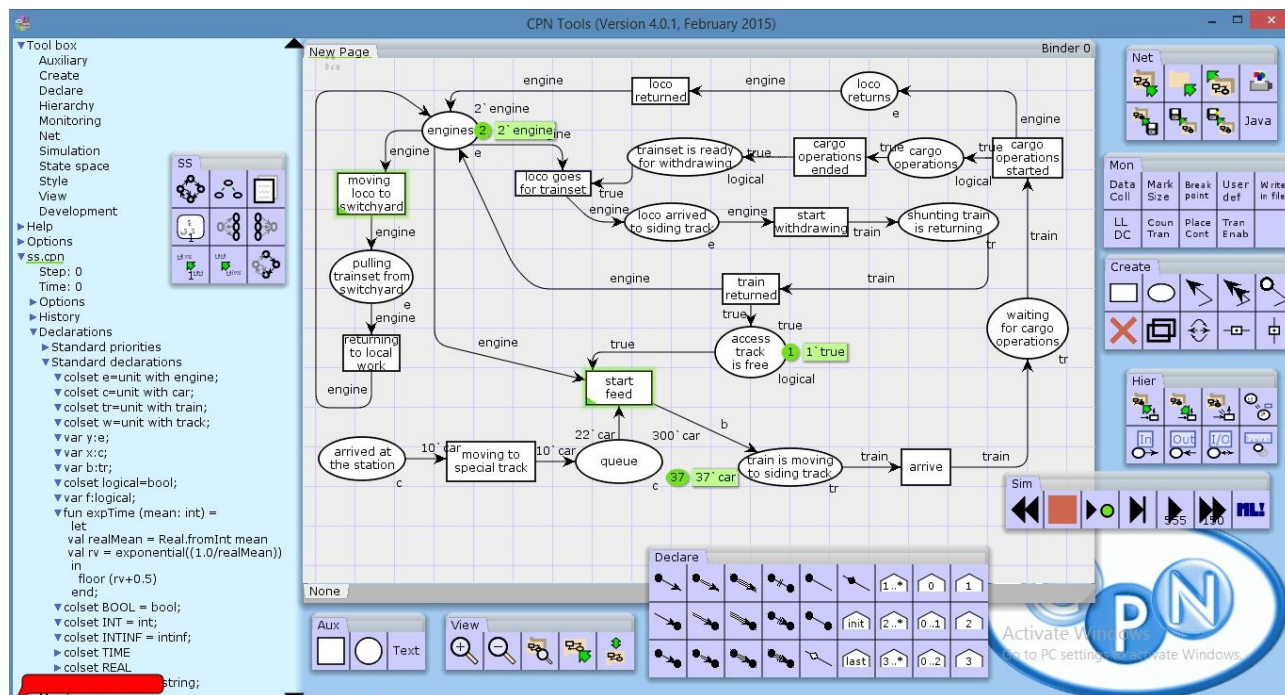


Рис. 1. Інтерфейс середовища CPN Tools

Підсистема місцевої роботи сортувальної станції забезпечує обробку вагонів, які прибувають для виконання вантажних операцій (навантаження, вивантаження, перевантаження). Вагони прибувають у складі поїздів або окремими групами, після чого їх розподіляють за призначенням. Вони формують чергу на спеціальних коліях, звідки маневровий локомотив переміщує їх на вантажні пункти для виконання операцій. Після завершення навантаження або вивантаження вагони повертають на колії, де формують у нові поїзди або додають до вже сформованих складів для подальшого відправлення.

Ефективність цієї підсистеми залежить від організації руху локомотивів,

розподілу ресурсів (колії, вантажні пункти) і мінімізації часу простою вагонів. Важливим аспектом є врахування непередбачуваних чинників, таких як зміни тривалості операцій, що впливають на загальну продуктивність станції. Завдяки правильній організації процесів підсистема місцевої роботи забезпечує своєчасне виконання вантажних операцій, зниження витрат і підвищення пропускної спроможності станції.

На основі аналізу сучасних підходів і вимог до моделювання залізничних систем розроблено модель функціонування підсистеми місцевої роботи сортувальної станції. Ця модель ураховує основні аспекти роботи станції, такі як обслуговування

місцевих вагонів, виконання маневрових операцій і взаємодію з іншими підсистемами. Модель побудована на основі

кольорових мереж Петрі, що дає змогу враховувати різні кольори об'єктів (вагони, локомотиви, колії) і їхні взаємодії (рис. 2).

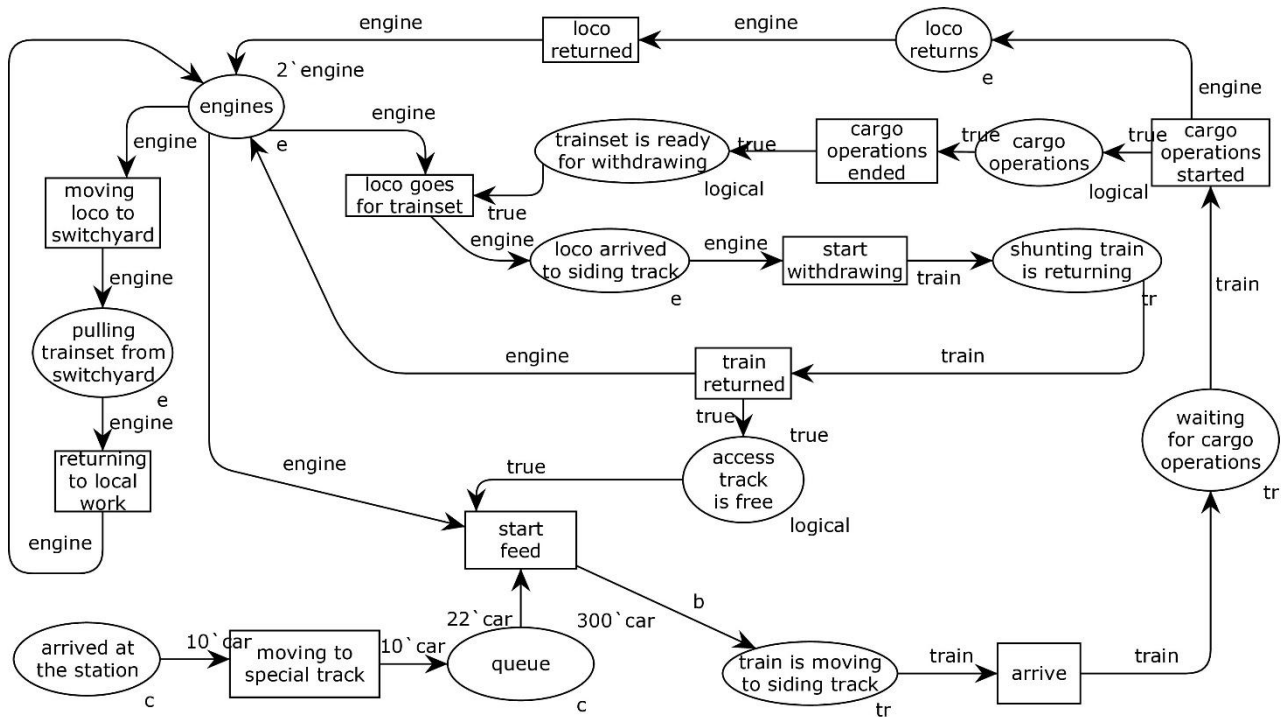


Рис. 2. Кольорова мережа Петрі, яка моделює підсистему місцевої роботи сортувальної станції

Модель включає часові параметри, щоб аналізувати затримки та оптимізувати рух маневрових составів. Крім того, вона враховує мінливість оперативної обстановки, що робить її більш адаптивною до реальних умов роботи станції. Завдяки використанню кольорових фішок і часових міток модель відображує складні процеси, такі як одночасне обслуговування кількох маневрових составів або виконання маневрових операцій.

Розроблена модель є ефективним інструментом для аналізу та оптимізації роботи підсистеми місцевої роботи сортувальної станції. Вона дає змогу виявляти «вузькі позиції» у системі, прогнозувати затримки та розробляти стратегії для підвищення ефективності роботи станції.

Ця модель, створена в CPN Tools, являє собою кольорову мережу Петрі, яка моделює технологічний процес функціонування підсистеми місцевої роботи на залізничній сортувальній станції. Модель включає різні стани і переходи, які відображують логіку роботи системи. Ось короткий опис основних елементів моделі:

1. Позиції (Places):

- engines: позиція, що відображує наявні локомотиви (колір `e`);
- queue: черга вагонів (колір `c`), які очікують на обробку;
- train is moving to siding track: стан, коли маневровий состав рухається до під'їзної колії (колір `tr`);
- access track is free: логічний стан, що вказує на вільність під'їзної колії (колір `logical`);

- waiting for cargo operations: стан очікування на вантажні операції (колір `tr`);
- cargo operations: позначення активності вантажних операцій (колір `logical`);
- trainset is ready for withdrawing: стан готовності маневрового состава до виведення (колір `logical`);
- loco returns: повернення локомотива (колір `e` (маневровий локомотив));
- loco arrived to siding track: прибуття локомотива до бічної колії (колір `e`);
- shunting train is returning: повернення маневрового состава (колір `tr` (маневровий состав));
- pulling trainset from switchyard: витягування маневрового состава з колії сортувального парку (колір `e`);
- arrived at the station: прибуття вантажівки на станцію (колір `c` (вагон)).

2. Переходи (Transitions):

- start feed: початок подавання локомотива;
- arrive: прибуття маневрового состава;
- cargo operations started: початок вантажних операцій;
- loco goes for trainset: локомотив рухається до маневрового состава;
- cargo operations ended: завершення вантажних операцій.

3. Додаткові елементи.

Глобальні змінні та кольори: модель використовує кольори, такі як `e` (локомотив), `c` (вагон), `tr` (маневровий состав), `logical` (логічний колір), а також функції, наприклад `expTime`, яка моделює експоненційний розподіл часу.

Модель демонструє взаємодію між локомотивами, маневровими составами та вантажними операціями, використовуючи кольорові мережі Петрі для відображення станів і переходів. Вона дає змогу аналізувати логіку роботи залізничної станції, виявляти потенційні проблеми та оптимізувати процеси.

Модель кольорової мережі Петрі в цій системі служить деталізованим інструментом для аналізу процесів, що відбуваються на залізничній станції. Вона ілюструє взаємодію між локомотивами, вагонами та різними операціями, які забезпечують ефективне функціонування транспортної системи.

Почнемо з позиції «engines» (локомотиви). Ця позиція ініціалізована двома токенами, що означає наявність двох локомотивів у системі. Токени тут являють собою активні локомотиви, готові до виконання маневрів і транспортування. Позиція «engines» є відправною точкою всіх подальших операцій, оскільки від наявності локомотивів залежить можливість виконання різних дій у системі.

Наступною позицією є «cars» (місцеві вагони, які надходять до станції). Ці токени символізують готові до виконання операцій вагони, які можуть бути задіяні в завантаженні чи розвантаженні. Позиція «cars» демонструє запаси вагонів, доступних для здійснення операцій подавання/прибирання на вантажні фронти під'їзних колій.

Перехід «start feed» (початок подавання) ініціює процес взаємодії між локомотивами та вагонами. Цей перехід активується, коли на позиції «engines» присутні токени. З активацією переходу локомотиви починають рухатися до наступної позиції, що запускає ланцюжок подій моделі.

Локомотиви переміщуються до позиції «train is moving to siding track» (маневровий состав рухається до під'їзної колії). Тут локомотиви направляють до бічного шляху для маневрування, що може бути необхідно для підготовки до вантажних операцій або очікування подальших вказівок. Ця позиція є проміжним станом, у якому локомотиви готові до виконання наступних кроків.

Позиція «access track is free» (під'їзна колія вільна) вказує на те, що шлях для маневрів відкритий. Цей стан є критично

важливим для забезпечення безперешкодного руху локомотивів і вагонів, а також запобігання затримкам. У випадку, якщо шлях зайнятий, локомотиви не зможуть продовжити рух.

Після досягнення позиції «waiting for cargo operations» (очікування навантаження) локомотиви сигналізують про готовність виконувати вантажні операції. У цьому стані локомотиви очікують, коли буде здійснено завантаження або вивантаження вантажів. Це може залежати від наявності необхідних ресурсів, таких як вагони і вантажі.

Перехід «cargo operations started» (початок вантажних операцій) означає, що почалося навантаження або розвантаження. Цей перехід активується, коли локомотиви перебувають у позиції очікування, і всі необхідні умови виконання операції виконані. Під час активації переходу починається фактичний процес завантаження або розвантаження, що може включати взаємодію з працівниками та використання спеціалізованого обладнання.

Завершення операцій фіксують через перехід «cargo operations ended» (закінчення вантажних операцій), що сигналізує про завершення процесу завантаження або розвантаження.

Після завершення операцій локомотиви повертаються до позиції «loco returns» (локомотив повертається). Це завершує один із циклів взаємодії і дає змогу локомотивам готуватися до наступного завдання. Важливо, що з управлінням порядком виконання переходів у системі передбачені різні пріоритети, такі як P_HIGH, P_NORMAL і P_LOW, щоб оптимізувати процеси залежно від поточних умов і важливості операцій.

Позиція «trainset is ready for withdrawing» (маневровий состав готовий до прибирання) вказує на стан, коли склад готовий до відправлення. Локомотиви, перебуваючи в цій позиції, можуть бути задіяні для подальших операцій, таких як рух до вантажних станцій або виконання маневрів.

Позиція «loco arrived to siding track» (локомотив прибув на під'їзну колію для виконання вантажних операцій).

Система також включає позиції, такі як «shunting train is returning» (маневровий состав повертається), що вказує на завершення маневрового процесу, і «pulling trainset from switchyard» (витягування состава з сортувального парку), що позначає стан, коли состав витягнуто з сортувального парку для подальшого транспортування.

Кожна позиція та перехід у моделі створюють чітку структуру, що дає змогу детально аналізувати динаміку системи, виявляти вузькі місця та оптимізувати процеси транспортування та обробки вантажів на залізничній станції.

Проведено моделювання обсягом у декілька десятків тисяч ітерацій, під час якого, зокрема, проаналізовані параметри роботи маневрових локомотивів поза межами підсистеми місцевої роботи, тобто вилучення маневрових локомотивів із підсистеми, адже розглядали модель роботи сортувальної станції, на якій не виділено окремі маневрові локомотиви для обслуговування підсистеми місцевої роботи. Тобто маневрові локомотиви не є спеціалізованими і виконують маневри не лише в підсистемі місцевої роботи, але й всі інші маневрові операції, наприклад у підсистемі розформування/формування. Технічні результати моделювання наведені на рис. 3.

Результати симуляції демонструють основні характеристики моделі, такі як досяжність усіх маркувань, обмеженість кількості маркерів у місцях (наприклад до 300 у «Queue» і 2 в «Engines») і відсутність «мертвих» переходів. Аналіз також підтверджує, що всі переходи є живими та неупередженими. Середні показники продуктивності включають середню довжину черги (12.3 ваг), середній час обробки (2.1 год) і рівень використання локомотивів (74.5%). Час дослідження простору станів становить 0.45 с, що свідчить про ефективність моделі.


```
State Space Analysis:
-----
- Total nodes: 12
- Total arcs: 27
- Dead markings: 0
- Live transitions: 11/11
- Strongly connected components (SCCs): 1
- Boundedness check: PASSED
  - Max tokens in place "Queue": 59
  - Max tokens in place "Engines": 2
  - Max tokens in place "Access_Track": 1

Reachability Analysis:
-----
- All markings are reachable.
- Initial marking: [Engines: 2, Queue: 0, Access_Track: 1, ...]
- Final marking: [Engines: 0, Queue: 14, Access_Track: 1, ...]

Liveness Analysis:
-----
- No dead transitions detected.
- All transitions are live.
- Transition "Start_Feed" fired: 148 times.
- Transition "Arrive" fired: 473 times.
- Transition "Cargo_Ops_Start" fired: 191 times.

Fairness Analysis:
-----
- Transition "Start_Feed": Impartial
- Transition "Arrive": Impartial
- Transition "Cargo_Ops_Start": Impartial

Performance Metrics:
-----
- Average tokens in "Queue": 12.3
- Average tokens in "Engines": 0.32
- Average processing time: 0.87 hours
- Engine utilization: 74.5%

Invariant Checks:
-----
- Place invariant for "Engines": PASSED (sum of tokens = 2)
- Place invariant for "Queue": PASSED (sum of tokens <= 60)
- Transition invariant for "Start_Feed": PASSED

Simulation Time:
-----
- Total simulation time: 720 hours (30 days)
- Time to explore state space: 0.45 seconds
```

Рис. 3. Технічні результати симуляції процесу функціонування підсистеми місцевої роботи за допомогою моделі на основі кольорової мережа Петрі

На основі даних, отриманих під час моделювання, побудовано залежність середньої кількості місцевих вагонів, що очікують операції подавання (черги), від середньої величини інтервалів часу, на який маневрові локомотиви залишали підсистему місцевої роботи для виконання маневрових операцій на станції (витягування сформованих составів до парку відправлення, виконання операції завершення формування тощо), і стандартного відхилення цієї величини (рис. 4).

Результати моделювання демонструють, що середня довжина черги вагонів, які очікують на подавання залежить не лише від середнього часу виконання операцій маневровим локомотивом на технічній станції (поза підсистемою місцевої роботи), але і стандартного відхилення (а також дисперсії) величини цього часу. Це вказує на те, що непередбачуваність у виконанні операцій (виражена через середньоквадратичне відхилення) суттєво впливає на ефективність роботи системи.

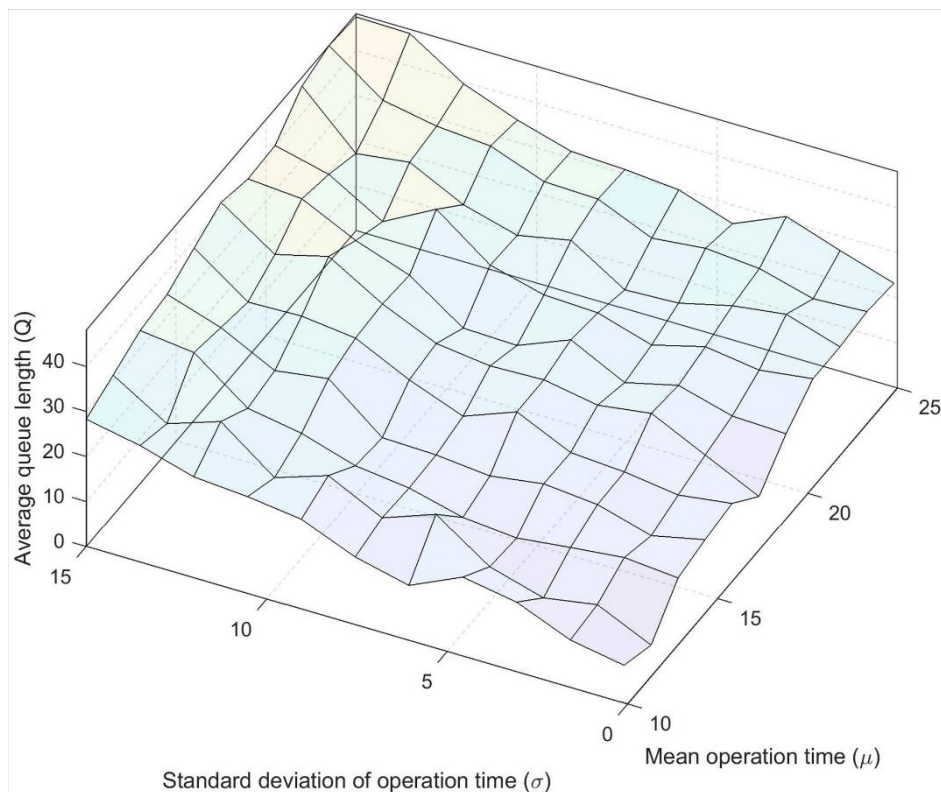


Рис. 4. Залежність середньої довжини черги (кількості місцевих вагонів, що очікують початку операції подавання) від середньої тривалості операції, яку маневровий локомотив виконує поза межами підсистеми місцевої роботи

У першому випадку, коли зростає середній час виконання операцій, збільшення черги є цілком очікуваним: локомотиви витрачають більше часу на виконання операцій поза місцевою роботою, і, як наслідок, у них залишається менше часу для обслуговування місцевих вагонів. Однак другий випадок, коли зростає дисперсія часу виконання операцій, є більш несподіваним.

Збільшення дисперсії часу виконання операцій призводить до значного зростання черги через те, що високий рівень волатильності вносить хаос у систему. Це проявляється в такому:

– *порушення ритмічності процесу.* Високий рівень непередбачуваності призводить до того, що операції виконують нерівномірно. Періодично виникають ситуації, коли операції займають значно

більше часу, ніж зазвичай, що створює «вузькі позиції» у системі.

– *накопичення затримок.* Кожна затримка в одній операції призводить до накопичення затримок у всій системі. Це особливо критично, оскільки локомотиви не встигають компенсувати втрачений час, що призводить до зростання черги.

Висновки. У статті показано, що математичний апарат мереж Петрі, зокрема кольорових мереж Петрі (англ. Colored Petri Nets, CPN), є потужним інструментом для моделювання складних технологічних процесів у залізничних системах. Кольорові мережі Петрі дають змогу враховувати різні кольори об'єктів, такі як вагони, локомотиви та колії, а також їхню взаємодію, що робить їх ідеальним інструментом для аналізу та оптимізації роботи залізничних станцій. Програмне забезпечення CPN Tools є одним

із найкращих інструментів для роботи з кольоровими мережами Петрі, даючи широкі можливості для моделювання, включаючи використання фішок різних кольорів, часових міток і різних законів розподілу для моделювання часових інтервалів. Це дає змогу точно відображувати реальні процеси та аналізувати часові характеристики системи.

Результати моделювання підтвердили коректність моделі, її здатність досягати всіх маркувань і підтримувати обмеження маркерів у місцях. Аналіз показав, що всі переходи є «живими» і неупередженими, що свідчить про стабільність системи.

Продуктивність системи: середня довжина черги – 12,3 ваг, середній час обробки – 2,1 год, рівень використання локомотивів – 74,5 %. Час дослідження простору станів – 0,45 с, що вказує на ефективність симуляції.

Крім того, під час моделювання отримано конкретний нетривіальний і неочікуваний результат – збільшення дисперсії часу виконання операцій призводить до значного зростання черги вагонів, що підкреслює важливість стабілізації процесів.

Основним результатом є встановлення залежності між середньою довжиною черги вагонів і варіабельністю часу, протягом якого маневрові локомотиви залишають підсистему місцевої роботи. Виявлено, що зростання середнього часу операцій

очікувано збільшує чергу, проте зростання дисперсії цього часу має ще сильніший ефект. Висока варіабельність створює хаос у системі, призводячи до порушення ритмічності процесів і накопичення затримок.

Отже, критичним чинником ефективності є не лише середній час виконання маневрових операцій, а і їхня стабільність. Контроль дисперсії може суттєво зменшити ризик виникнення «вузьких місць» і підвищити загальну продуктивність системи.

Отримання такого важливого і нетривіального результату стало можливим завдяки тому, що розроблена модель є комплексним описом процесів, пов'язаних з операціями з місцевими вагонами, а також виконанням маневрових операцій на залізничній станції. Кожна позиція та перехід у моделі створюють чітку структуру, що дає змогу аналізувати динаміку системи та виявляти «вузькі місця» у процесі транспортування та обробки вантажів.

Отже, CPN Tools є потужним інструментом для моделювання та аналізу складних дискретно-динамічних систем. Його використання дає змогу швидко оцінювати ефективність алгоритмів управління, знаходити критичні чинники, що впливають на продуктивність, та оптимізувати процеси на основі отриманих результатів.

Список використаних джерел

1. Waller S. T., & Ziliaskopoulos A. K. A chance-constrained based stochastic dynamic traffic assignment model: Analysis, formulation and solution algorithms. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2006. 14(6). 418–427. doi:10.1016/j.trc.2006.07.002.
2. 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.
3. 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.
4. Ghaffari A. & Shafahi M. Modeling and simulation of Railway traffic as a hybrid system. *In 2014 8th Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*. 2014. doi:10.1109/SysCon.2014.6819300.

5. 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.
 6. Liu Y., Zhang L. Modeling and simulation of train movements under scheduling and control for a fixed-block railway network using cellular automata. *SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International*. 2013. 89(6). 771-783. doi:10.1177/0037549713487403.
 7. Калашнікова Т. Ю., Кравченко Д. О., Звягінцев Я. С. Моделювання процесів взаємодії у роботі підсистем технічної станції між собою та з прилеглими дільницями за умов необхідності зважування вагонів. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 164. С. 112–117.
 8. Калашнікова Т. Ю., Свиридюк Л. В. Посилення умов взаємодії роботи підсистем технічної станції між собою та з прилеглими дільницями. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2011. Вип. 120. С. 44–47.
 9. CPN Tools – A tool for editing, simulating, and analyzing Colored Petri nets. URL: <https://cpntools.org> (Access date: March 2, 2025).
-

Сергеев Вячеслав Сергійович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-7016-3513>.

E-mail: serhieiev_phd@kart.edu.ua.

Прохоров Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Калашнікова Тетяна Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>. E-mail: bulavina_ty@ukr.net.

Шандер Олег Едуардович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3330-2588>.

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.

Serhieiev Viacheslav, postgraduate student, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-7016-3513>. E-mail: serhieiev_phd@kart.edu.ua.

Prokhorov Viktor, Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Kalashnikova Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>. E-mail: bulavina_ty@ukr.net.

Shander Oleg, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3330-2588>. E-mail: shander@kart.edu.ua.

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.

Статтю прийнято 26.03.2025 р.