

УДК 656.225

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.162143

Підвищення ефективності організації передавальних поїздів в розвинених залізничних вузлах через впровадження «гнучких моделей»

**В. І. Мацюк, В. К. Мироненко, В. О. Хорошко, А. В. Прохорченко,
Т. М. Грушевська, Р. С. Щербина, Н. О. Мацюк, Ю. Є. Хохлачова,
І. Г. Бізюк, М. П. Тимченко**

Проведено дослідження ефективності організації передавальних поїздів в розвинених залізничних вузлах за критерієм сукупних вагоно-годин простою під накопиченням. Розроблені дискретно-подієві імітаційні моделі (Java SE, AnyLogic) організації передавальних поїздів за «жорстким графіком» та за накопиченням до норми составів. В моделях враховано стохастичну природу надходження вагонів у пункти накопичення та дотримання составів до встановленої норми. При моделюванні вважається, що колійний розвиток залізничних станцій та внутрішньовузлових ходів є раціональним, та несуттєво впливає на затримку руху передавальних поїздів. Графік руху передавальних поїздів є раціональним та ритмічним. Пропускна спроможність перегонів вузла та переробна спроможність підсистем залізничних станцій є достатніми.

Експериментально проведено порівняння ефективності чотирьох моделей організації передавальних поїздів, у тому числі «гнучкою моделлю», яка поєднує відправлення за накопиченням до норми состава і «жорстким графіком» одночасно. Встановлено, що мінімальні вагоно-години накопичення досягаються при організації передавальних поїздів комбінованим варіантом: одночасне відправлення і за «жорстким графіком» і накопиченням до норми. Результат експерименту виявив найбільш ефективний варіант організації передавальних поїздів, а саме комбінований варіант. Даний варіант передбачає, що при наявності достатньої кількості вагонів у пункті накопичення поїзд відправляється раніше (відправлення за накопиченням до норми), інакше – через розрахунковий середній інтервал (варіант відправлення за «жорстким графіком»). Організація передавальних поїздів за «жорстким графіком» потребує організації додаткових поїздів, інакше суттєво зростає черга із вагонів у пунктах накопичення. При збільшенні добової кількості поїздів на 10–11 % процес формування та відправлення стає достатньо надійним та ефективним.

Зазначенні рекомендації дозволять удосконалити типовий процес роботи залізничних вузлів у частині диспетчерського контролю за формуванням, відправленням та пропуском передавальних поїздів у внутрішньовузловому сполученні

Ключові слова: розвинений залізничний вузол, час доставки, графік руху поїздів, імітаційне моделювання, стохастичний потік

1. Вступ

У науковому середовищі, серед фахівців транспортних технологій та організації перевезень на залізничному транспорті, постійно ведеться дискусія щодо способу організації поїздів на залізничних напрямках, дільницях, залізничних вузлах. Розглядаються два основних варіанта: відправлення поїздів при накопиченні до норми состава та відправлення поїздів за «жорстким графіком», незалежно від наявної кількості вагонів.

Вважається, що при умові накопичення до норми (особливо при низькій інтенсивності надходження вагонів у пункти накопичення) збільшуються вагоно-години накопичення. Цей процес, у свою чергу, призводить до суттєвого збільшення часу формування складу, і, як наслідок, до збільшення технологічних термінів доставки вантажів.

При організації за жорстким графіком забезпечується належна ритмічність взаємодії «залізниця – клієнт», однак даний спосіб, як вважається, не забезпечує належної ефективності використання тягового рухомого складу та залізничної транспортної інфраструктури через, як правило, неповні состави поїздів.

Дослідити зазначену проблематику аналітичними моделями складно, через комплексність та масштабність процесу, особливо при врахуванні імовірнісного надходження вагонів у пункти накопичення. Отже, вирішення зазначеної науково-прикладної задачі залишається актуальним і на сьогодні, і може бути вирішено імітаційним моделюванням.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналіз сучасних досліджень в сфері вдосконалення технології роботи в розвинутих залізничних вузлах показує, що особливу увагу приділяють саме оптимізації процесу розформування-формування составів на технічних станціях та формалізації моделей функціонування транспортних систем. Розробка математичної моделі оптимізації сортувального процесу наведена у роботі [1], в основі якої лежить розподіл колій формування сортувальної станції для вихідних вантажних поїздів із врахуванням реалістичних обмежень за розкладом поїздів, своєчасності прибуття і відправлення, а також пропускної спроможності колії. Слід зазначити, що дана модель дозволяє тимчасово зберігати вантажні вагони на спеціально призначеній для цього змішаній колії, проте не включає різні варіанти відправлення поїздів.

У роботі [2] зазначено вплив основних технологічних параметрів на ймовірність відмови та час безвідмовної роботи вчасного приймання та відправлення вантажних поїздів. Такий підхід враховує технологічні особливості вагонопотоків, проте є недосконалим, оскільки не вирішує дану задачу комплексно для полігону залізниць. У дослідженнях [3] зазначається схожа, із попередніми роботами, проблематика працездатності та відмовостійкості технологічних процесів залізниць, однак в аспекті перевезення тільки небезпечних вантажів.

У роботі [4] зазначається, що при моделюванні технологічних процесів залізниць доцільно використовувати дискретно-подієве моделювання, оскільки

цей спосіб дозволяє розробити моделі, що із високою адекватністю формалізують технологічні процеси парків залізничних станцій. Одними із суттєвих переваг такого імітаційного моделювання є можливість дослідження складного стохастичного процесу та визначення затримок між етапами обробки поїздів на коліях парків. Проте данні моделі не можуть використовуватись для оцінки ефективності функціонування сортувальних парків, де здійснюється накопичення вагонів до норми складів. Узгодження процесу формування згрупованих поїздів із графіком руху, через відповідні оптимізаційні моделі, дозволяють прискорити доставку вантажів залізничним транспортом [5], однак відкритим залишається питання узгодження відправки передавальних поїздів у розвинених залізничних вузлах із інтенсивним пасажирським рухом.

Для аналізу і прогнозування часу затримок, організації поїздів на ділянках, у роботі [6] розроблено модель нечіткого управління, що забезпечує можливість автоматизації процесів експлуатації парків технічних систем з урахуванням нечітких параметрів систем управління. Проте невідомо, як запропонована модель може використовуватись для оцінки технологічних процесів сортувальних станцій в розвинених залізничних вузлах. У роботі [7] на теоретико-методологічному інструментарії теорій ігор запропонований підхід до формування оптимального механізму забезпечення погодженого управління процесом доставки вантажів в загальнотранспортних вузлах. Однак використаний методологічний інструментарій теорій ігор не враховує технологічні параметри вагонопотоків та характеристики процесу доставки вантажів.

Дослідження [8] направлені на прискорення формування групових поїздів через алгоритмізацію та скорочення експлуатаційних витрат, пов'язаних з перебуванням рухомого складу на сортувальних станціях. Таким чином, можна стверджувати, що критерієм оцінки доцільності встановлення призначень вантажних поїздів автори використовують критерій мінімізації вагоно-годин, що витрачаються на накопичення і переробку вагонів. Проте не відомий вплив на зазначенні показники від способу організації поїздів.

Особливості процесу накопичення вагонів при «жорсткому графіку» (відправлення поїздів щодоби в один і той же час і слідування їх по взаємопов'язаним ниткам графіка на всій протяжності маршруту) запропоновані у роботі [9]. Це підтверджує перспективність застосування математичних моделей щодо раціональної організації передавальних поїздів в розвинених залізничних вузлах. Детально розглядається процес накопичення вагонів, з урахуванням надходження окремих груп вагонів, що визначають витрати вагоно-годин на накопичення вагонів. У роботі [10] зазначено, що простій вагонів під накопиченням составів є важливою частиною основного якісного показника роботи сортувальної станції – загального часу простою вагонів на станції. Окрім цього, середньодобові витрати вагоно-годин на накопичення по кожному поїзному призначенню є важливим параметром при розрахунку плану формування поїздів.

У роботі [11] проаналізовано вплив системних відмінностей у залізничному транспорті між Північною Америкою та Європою, наведено короткий огляд

відповідних оптимізаційних моделей. У порівнянні з Північною Америкою, залізничні компанії в Європі стикаються з серйозними економічними проблемами в управлінні вантажопотоками. Підтверджено результатами, що Північноамериканські залізничні компанії мають менші витрати на перевезення, ніж європейські, за рахунок того, що північноамериканські моделі, в основному, орієнтовані на пошук коротких відстаней для кожного вагона, а європейські – на високий рівень накопичення до норми составів. Слід зазначити, що данні дослідження не враховують особливостей технологічних процесів розвинених залізничних вузлів.

Оптимізація процесу формування (розформування) складів на технічних станціях за допомогою математичної моделі з нечіткими витратами для планування формування поїздів представлена у роботі [12]. У представленій моделі витрати розглядаються в трьох варіантах: оптимістичному, нормальному і песимістичному. Для налаштування параметрів застосовується трьохетапний метод з використанням підходу планування експериментів. Щоб оцінити ефективність і дієвість запропонованого алгоритму, результати порівнюються з результатами сучасного програмного забезпечення для оптимізації. План формування поїздів визначає маршрут, частоту поїздів, вимоги до поїздів, проте не враховує можливість відправлення поїздів за «жорстким графіком».

Математична модель доставки масових вантажів маршрутами залізничного транспорту, яка враховує взаємодію виробництва, транспорту та споживання запропонована у роботі [13]. Дана модель дозволяє вирішити широке коло завдань: які постають перед постачальниками і споживачами при виборі залізничного транспорту, та пов'язана із плануванням і управлінням експлуатаційною роботою станцій. Проте запропонована математична модель доставки вантажів маршрутами залізничного транспорту не дозволяє промодельовувати різні варіанти організації передавальних поїздів у вузлі, зокрема: за накопиченням до норми, за жорстким графіком та комбіновані. Їх практичне використання дозволить більш точно і обґрунтовано нормувати простій вагонів під накопиченням.

В роботі [14] запропоновано зменшення витрат на транспортування вантажів та зменшення непродуктивного часу простоїв. Визначено фактори, які впливають на своєчасність прибуття вантажів. У [15] запропонована методологія, застосування якої дозволяє здійснювати вибір раціональної технології доставки вантажів виробничо-технічного призначення в міжнародному сполученні. Але залишились невирішені питання, що дозволяють моделювати процес доставки вантажів для альтернативних варіантів, в залежності від технологічних параметрів.

Проведені наукові дослідження [16] підтверджують, що процес накопичення вагонів залежить від норми состава поїзду і від способу реалізації графіка руху поїздів по відправленню. Встановлено три варіанта накопичення состава поїздів:

– стала норма состава поїзда при відправленні поїздів по гнучкому графіку руху;

– гнучка норма состава поїзда при відправленні поїздів по гнучкому графіку руху;

– норма состава поїзда обмежена встановленим діапазоном при відправленні поїздів за «жорстким графіком».

Однак, слід зазначити, що перераховані дослідження не враховують стохастичної природи надходження вагонів у пункти накопичення. Комплексні моделі оцінки ефективності за критерієм мінімальних (сукупних) вагоно-годин накопичення (при умові стохастичного надходження вагонів у пункти накопичення) відсутні. Згідно [17] при існуючій системі організації роботи в крупному вузлі середня тривалість знаходження місцевого вагона складала 62,17 години, при цьому найбільшу частку (97,8 %) часу вагон знаходиться на технічних станціях. У порівнянні з «піковим» за обсягом місцевої роботи 2007 роком у 2017 році простій вагону на одній технічній станції збільшився з 8,88 год до 15,89 год (на 78,9 %). Це обумовлює проведення додаткових досліджень через розробку комплексних імітаційних моделей та експериментальне визначення сукупних годин простою вагонів під накопиченням при різних способах організації передавальних поїздів.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою досліджень є виявлення закономірностей впливу способів організації передавальних поїздів у розвинених залізничних вузлах на ефективність передавального сполучення за критерієм мінімальних (сукупних) годин накопичення вагонів у пунктах формування поїздів. Результати експериментів дозволяють встановити оптимальну модель організації передавальних поїздів, що на практиці, тільки через організаційні зміни, забезпечить зменшення втрат часу при формуванні складів передавальних поїздів та, як наслідок, призведе до зменшення (у середньому) часу доставки вантажів.

Для розв'язання вказаного науково-прикладного завдання передбачається:

– обґрунтувати критерії ефективності технологічної системи організації передавальних поїздів;

– розробити імітаційні моделі організації передавального руху за жорстким графіком та накопиченням составів до встановленої норми за умови стохастичного надходження вагонів у пункти накопичення;

– експериментально встановити найбільш ефективну модель системи організації передавальних поїздів за визначеним критерієм.

4. Інструментарій дослідження та критерії ефективності передавального руху в розвинених залізничних вузлах

4. 1. Обґрунтування критерію ефективності технологічної моделі організації передавальних поїздів

Процес організації передавальних поїздів в розвинених залізничних вузлах укрупнено можна представити як послідовність із трьох операцій:

1) накопичення місцевих вагонів у пунктах формування складів передавальних поїздів, тобто на сортувальних (у прямому напрямку) та вантажних станціях (у зворотному напрямку) станціях;

- 2) формування складу передавального поїзда;
- 3) відправлення та слідування поїзда у внутрішньовузловому сполученні.

Всі перераховані процедури виконуються у однаковій послідовності, не залежно від способу організації передавальних поїздів: за «жорстким графіком», накопиченням до норми чи іншими способами. Крім того, не зважаючи на варіант організації передавальних поїздів, тривалість технологічних операцій із ними на кожній конкретній станції (тривалість розформування, закінчення формування, обробки складів по відправленню) та тривалість їх слідування (руху по міжстанційних перегонах) в середині вузла (за одним маршрутом) буде однаковою.

Таким чином, загальний час організації передавальних поїздів у розвинених залізничних вузлах своєю тривалістю, у переважній більшості, відрізнятиметься тільки на час, що витрачатиметься на накопичення вагонів на станціях формування. Тому саме сукупні витрати часу на накопичення вагонів на станціях формування буде використано як критерій оцінки технологічної ефективності моделей організації передавальних поїздів в розвинених залізничних вузлах.

4. 2. Теоретичне обґрунтування та розробка імітаційної моделі організації передавальних поїздів у розвинених залізничних вузлах

Враховуючі зазначене вище, імітація процесу накопичення, схематично, матиме наступний вигляд: генератор надходження заявок – накопичувач (черга) – затримка (імітація закінчення формування складу, обробки по відправленню та слідуванні поїзда між станцією формування та станцією призначення) (рис. 1).



Рис. 1. Структурно-логічна схема імітації процесу організації передавальних поїздів в розвинених залізничних вузлах

Потік надходження вагонів у пункт накопичення можна представити як простіший, оскільки він є стаціонарним (непереривним), ординарним (умовно) та із відсутністю післядії. Кількість вагонів, що надходить за одиницю часу (добу) підпорядковуються розподілу Пуассона, часові інтервали надходженням вагонів – експонентному.

При організації поїздів за накопиченням до норми при надходженні заявки до другого блоку реалізовуватиметься процедура перевірки:

$$m_{\text{черг.}} \geq m_{\text{норм.}} \quad (1)$$

де $m_{\text{черг.}}$ – фактична кількість вагонів під накопиченням (в очікуванні відправки) в момент t_i модельного часу надходження i -ї заявки в блок два моделі, ваг.; $m_{\text{норм.}}$ – норма складу (у умовних вагонах) на даному залізничному напрямку, вагонів.

Поїзд буде відправлений по факту накопичення вагонів на станції формування до норми складу передавального поїзда. У даному випадку вважається, що поїзд не чекає найближчої нитки графіка, і відправляється за готовністю за диспетчерським розкладом.

При організації поїздів за жорстким графіком використовується відправлення поїздів за встановленим графіком відправлення поїздів. В такому випадку ідеальним графіком буде той, що забезпечує максимальну ритмічність. Інтервал між відправленням поїздів повинен бути однаковим або максимально рівним. Величина інтервалу визначатиметься через потрібні розміри руху при відомих загальних середньодобових вагонопотоках та середньому складі поїзда (нормі складу):

$$\overline{I}_{\text{перед.}} = \frac{\overline{N}_{\text{доб.}}}{m_{\text{норм.}}}, \quad (2)$$

де $N_{\text{доб.}}$ – середньодобова кількість місцевих вагонів.

Кожний новий передавальний поїзд відправлятиметься зі станції формування при настанні моменту часу t_{j+1} при будь-якій наявності заявок (вагонів) у другому блоці $m_{\text{черг.}} > 0$, навіть якщо немає достатньої кількості вагонів для формування повноскладового передавального поїзда, тобто $m_{\text{черг.}} < m_{\text{норм.}}$.

Видом імітаційного моделювання буде дискретно-подієве моделювання (англ. discrete-event simulation, DES), оскільки сам процес надходження вагонів у пункти накопичення, формування, відправлення та слідування по перегонах передавальних поїздів можна представити як дискретно-подієвий. Більш детально дане твердження, для залізничних технологічних процесів, обґрунтовано у працях [2, 4, 5].

Ключовим при експериментальному аналізі варіантів організації передавальних поїздів є заміри між фазовими переходами надходження та відправлення заявок (вагонів) в блоках 1, 2 та 3 імітаційних моделей (рис. 1). Враховуючі це, кожна заявка повинна мати можливість фіксації моментів часу фазового переходу між станами технологічної системи – блоками імітаційної моделі. Одним із найбільш зручних способів реалізації зазначеної функції є використання об'єктно-орієнтовних принципів. При його використанні кожна окрема заявка моделювання представлятиме екземпляр окремо класу із додатковими полями t_{1-2} , t_{2-3} . Дані поля, відповідно, означають моменти фазового переходу кожної окремої заявки між блоками 1–2 та 2–3. Тоді загальні вагоно-години простою під накопиченням дорівнюватимуть:

$$B_2 = \sum (t_{2-3} - t_{1-2}). \quad (3)$$

Саме при такому підході буде забезпечуватись «пономерний» облік кожної окремої заявки (вагону) під час всього процесу моделювання. Зазначений спосіб дослідження дозволяє встановити, у якій момент модельного часу кожний окремих вагон (заявка) поступив у пункт накопичення (змінна t_{1-2}) та у якій момент модельного часу даний конкретний вагон перейшов у іншу фазу обробки (закінчення формування, обробка по відправленню та відправлення), (змінна t_{2-3}). Серед більшості існуючих інструментів дослідження транспортних процесів та систем (аналітичне, графоаналітичне або імітаційне (але не об'єктно-орієнтовне а, наприклад, функціональне) моделювання) даний спосіб, практично, єдиний, що дозволяє досліджувати міжопераційні простоти (тобто різницю між моментами часу змінних t_{2-3} t_{1-2}) стохастичних процесів на транспорті протягом значної тривалості реального часу (5, 10 та більше років).

Одним з небагатьох (серед доступних для прикладних досліджень) засобів розробки імітаційних моделей, за об'єктно-орієнтовними принципами, є компілятор *Java* та середа розробки програмних продуктів *Eclipse*. Тому імітаційну модель розроблено засобами мови програмування *Java* із використанням додаткових бібліотек *AnyLogic*.

Модель реалізовано як взаємозв'язок трьох генерацій заявок. Перша генерація, блоки: *sourceCars* – генератор потоку заявок-вагонів (клас *Cars*) із контейнерами; *queue* – черга що імітує процес накопичення на станції формування передавального поїзда; *hold* – імітація закінчення формування складу та відправлення вагонів зі станції у складі передавального поїзда; *sink* – збір статистичних даних по оброблених заявках.

Друга генерація, блоки: *sourceTrain* – генератор заявок-поїздів (клас *Train*) у вигляді запланованих добових розмірів руху передавальних поїздів; *queue1* – черга що імітує наявність вільних ниток графіка передавальних поїздів; *hold1* – імітація відправлення поїзда за ниткою графіка. В даному блоці відсутній блок типу *sink*, через те, що одні й ті ж самі заявки-поїзди кожної нової доби закладено у графік руху поїздів.

Третя генерація, блоки *sourceTimer* та *sink1* призначені для відліку модельного часу. Кожної хвилини (рівномірним розподілом) генерується заявка що відповідає перебігу часу. Даний блок використовується тільки при моделюванні жорсткого графіка відправлення передавальних поїздів.

Параметрами моделі є *carsOnDay* (тип *int*) – добовий вагонопотік, *normCarsInTrane* (тип *int*) – норма складу передавального поїзда, вагонів; *onTable* (тип *boolean*) – перемикач умов моделювання за жорстким графіком, чи по накопиченню.

Додаткові змінні моделі: *trains* (тип *int*) – потрібні розміру руху поїздів; *carsToTrain* (тип *int*) – фактична кількість вагонів, що відправляється поїздом; *departureInterval* (тип *double*) – середній інтервал відправлення поїздів; *lastTimeArrive* (тип *double*) – модельний час останнього фактичного

відправлення поїзда; carsToTrainForStat (тип int) – фактична кількість вагонів, що була відправлена поїздом.

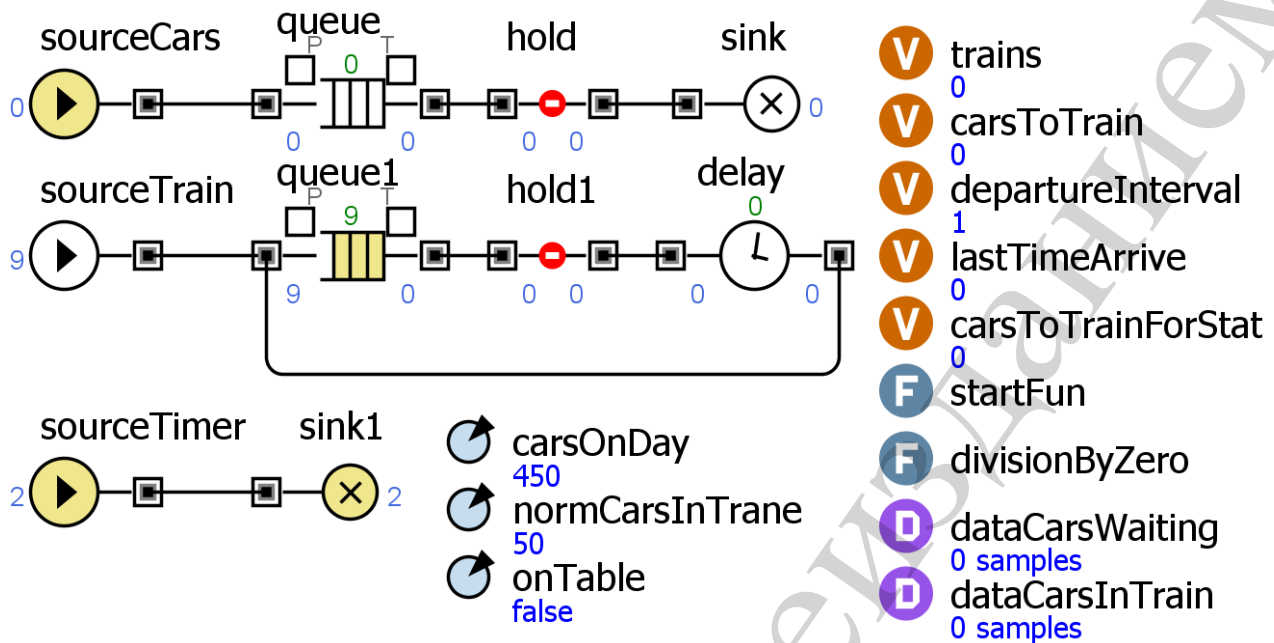


Рис. 2. Імітаційна модель організації передавального руху у розвиненому залізничному вузлі

При моделюванні відправлення поїздів за жорстким графіком на старті моделі реалізується Java-код функції startFun(), яким визначаються: добова потрібна кількість ниток графіка (*trains*), середній інтервал між відправленням поїздів (*departureInterval*) та модельний час відправлення першого поїзда (*lastTimeArrive*):

```

if (onTable){
    trains = (int)(carsOnDay/normCarsInTrane);
    departureInterval = 1440 / (trains);
    lastTimeArrive = departureInterval;
}
    
```

Кожної хвилини реалізується інший Java-код, що моделює відправлення поїзда за наступною жорсткою ниткою графіка:

```

if (onTable && time()>= lastTimeArrive){
    hold1.setBlocked(false);
    lastTimeArrive += departureInterval;
}
    
```

При моделюванні відправлення поїздів за накопиченням до норми складу, при надходженні кожної нової заявки-вагону у блок *queue* реалізується Java-

код, що перевіряє наявність необхідної кількості вагонів (за нормою) для можливості сформування повносоставного поїзда:

```
if (!onTable){
    if (queue.size() >= normCarsInTrane){
        carsToTrain = normCarsInTrane;
        carsToTrainForStat = carsToTrain;
        hold.setBlocked(false);
        hold1.setBlocked(false);
    }
}
entity.time_Q = time();
```

На вході до блоку *queue* параметру *time_Q* кожної заявки-вагона присвоюється фактичний модельний час, що відповідає початку відліку простою вагону під накопиченням на станції формування. При виході заявок-вагонів із блоку *queue* (імітація початку закінчення формування складу передавального поїзда) реалізується збір статистики простою вагонів під накопиченням, та її систематизація:

```
dataTrainWaiting.add(time() - entity.time_Q);
```

Процедурою *dataTrainWaiting* визначаються загальні імовірнісні характеристики розподілу простоїв вагонів під накопиченням: математичне очікування, стандартне відхилення, щільність імовірності, тощо.

4. 3. Реалізація імітаційної моделі організації передавальних поїздів на прикладі Одеського залізничного вузла. Вихідні параметри базового моделювання

Реалізація моделі проводилась для передавального руху Одеського залізничного вузла, одного з найбільших в Україні. Даний транспортний вузол характеризується значними обсягами вантажної роботи, що здійснюється при взаємодії залізничного та морського транспорту. Зокрема в цьому транспортному вузлі значний обсяг контейнерних перевезень формується між залізничним станціями Одеса-Ліски та Одеса-Порт.

Одеса-Ліски у зазначеному процесі представляє собою аналог «сухого порту» – транспортно-складського комплексу, функціональним призначенням якого є накопичення контейнерів, що прибувають до Одеського регіону залізничним та автомобільним транспортом. Слід зазначити, що передавальні поїзди у бік станції Одеса-порт формуються на цій станції, минаючи технічні станції Одеського залізничного вузла.

Позакласна станція Одеса-порт є вантажною і призначена для безпосереднього обслуговування перевантажувальних терміналів Одеського морського торговельного порту.

Таким чином, у одному напрямку (умовно прямому) передавальні поїзди із контейнерами формуються на станції Одеса-Ліски та слідуєть до станції Одеса-Порт. У іншому (умовно зворотному) напрямку контейнери, що прибувають суднами до портів Одеського регіону передавальними поїздами, що формуються у тому числі на станції Одеса-порт, прямують у більшості до станції Одеса-Ліски, звідки відправляються за межі Одеського транспортного вузла.

Вихідні параметри моделі відповідають піковому періоду інтенсивності із середньодобовим вагонопотоком у 450 вагонів. Норма складу передавального поїзда 50 ваг.

4. 4. Обмеження та припущення моделювання. Валідація програмного коду, адекватність моделі та оцінка достовірності результатів

При розробці моделі вважається, що:

1) вхідний потік транзитних поїздів є найпростішим, а тому, – Пуассонівським;

2) при умові організації за жорстким графіком, графік руху поїздів є ритмічним і раціональним: нитки графіка передавальних поїздів розподілені у межах доби за приблизно рівним інтервалом, який становить $1440/N_{\text{перед}}$ ($N_{\text{перед}}$ – середньодобова кількість передавальних поїздів). При організації поїздів за накопиченням до норми поїзди відправляються зі станцій формування за готовністю, за диспетчерським розкладом;

3) колійний розвиток станцій та технічне оснащення ходів залізничного вузла є раціональним. Кількість локомотивів передавального руху та інших технологічних елементів (приймально-відправних колій станційних парків, локомотивних бригад та інше) є достатньою. Наявні пропускна та переробна спроможності залізничних транспортних підсистем вузла є задовільними та суттєво не впливають на затримку часу при накопиченні, формуванні, відправленні та прийманні передавальних поїздів;

4) вибір заявки у підсистемах станцій та вузла (парки формування, дільниці наближення) здійснюється за принципом *FIFO* (*first in – first out*) – вибирається та заявка, що увійшла у стан очікування раніше.

Валідація імітаційної моделі проводилась при тестуванні як окремих її блоків, так і моделі в цілому. Моделлю у повній мірі відпрацьовується алгоритм формування поїздів за накопиченням і формуванням по факту відправлення за жорстким графіком.

Необхідний рівень достовірності результатів моделювання забезпечується через визначення мінімальної кількості ітерацій та мінімальної тривалості модельного часу кожного експерименту [2]. Встановлено, що достовірність на рівні не менше 0,95 забезпечуються при чотирьох ітераціях та модельному часі не менше 150 місяців.

5. Результати експериментів із імітаційною моделлю організації передавального руху поїздів у розвиненому залізничному вузлі

Моделювання із базовими вихідними параметрами проводилось для чотирьох варіантів організації передавальних поїздів:

1. При відправленні після накопичення до норми складу.
2. При відправленні за жорстким графіком.
3. При відправленні за жорстким графіком, за умови забезпечення технологічної безвідмовності на рівні 95 %. Даний спосіб організації передбачає збільшення добової кількості поїздів для зменшення середнього інтервалу їх відправлення і, як наслідок, зменшення імовірності відмови вчасного відправлення вагонів із пунктів накопичення.
4. Гнучка модель – представляє сукупність першої та другої: при наявності достатньої кількості вагонів у пункті накопичення поїзд відправляється раніше (перша модель); в протилежному випадку – через розрахунковий середній інтервал (друга модель).

При моделюванні отримані наступні результати (табл. 1, рис. 3–5).

Таблиця 1

Вихідні параметри та результати базового моделювання

	Варіант та назва моделі			
	1	2	3	4
Вихідні параметри та результати базового моделювання	При відправленні після накопичення до норми складу	При відправленні за жорстким графіком	При відправленні за жорстким графіком, за умови забезпечення технологічної безвідмовності на рівні 95%	Гнучка модель
Вихідні параметри моделювання:				
Середньодобовий вагонопотік, вагонів	450	450	450	450
Норма складу, вагонів	50	50	50	50
Планові розміри руху, поїздів на добу	9	9	9+4	9
Вхідний потік вагонів у пункт накопичення	Пуассона			
Результати моделювання:				
Середнє та варіація кількості поїздів за добу	9,0; 6,3 %	9,0; 0 %	13,0; 0 %	9,5; 5,4 %
Середнє та варіація інтервалу відправлення поїздів, годин	2,6; 14,0 %	2,6; 0 %	1,8; 0,0 %	2,5; 8,4 %
Середнє та варіація кількості вагонів у складі, вагонів	50; 0 %	49,9; 1,2 %	34,3; 16,9 %	47,2; 8,4 %
Середнє та варіація часу очікування вагона під накопиченням, годин	1,3; 62,2 %	15,1; 63,9 %	0,9; 57,7 %	1,2; 59,7 %
Середній розмір черги під накопиченням, вагонів	24,4	284,8	17,1	23,2

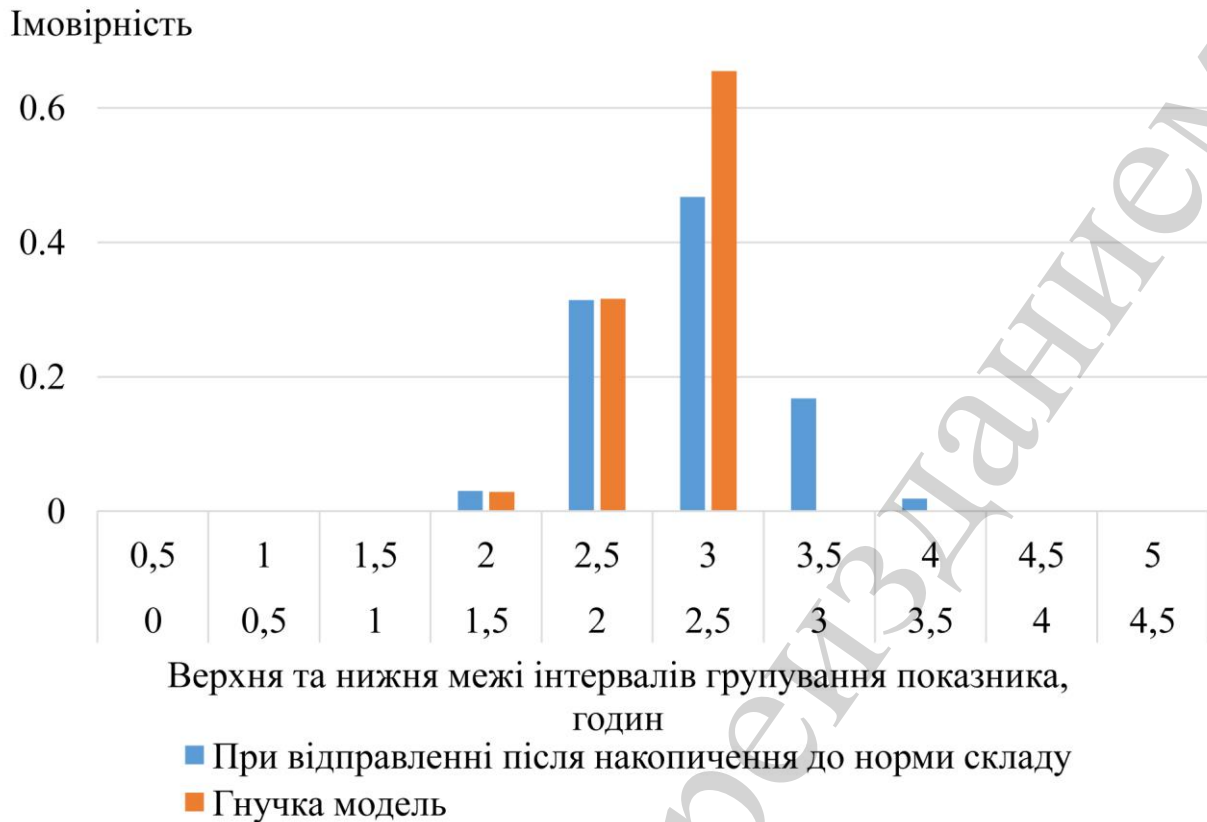


Рис. 3. Щільність розподілу імовірності інтервалів відправлення передавальних поїздів при організації їх за накопиченням до норми складу

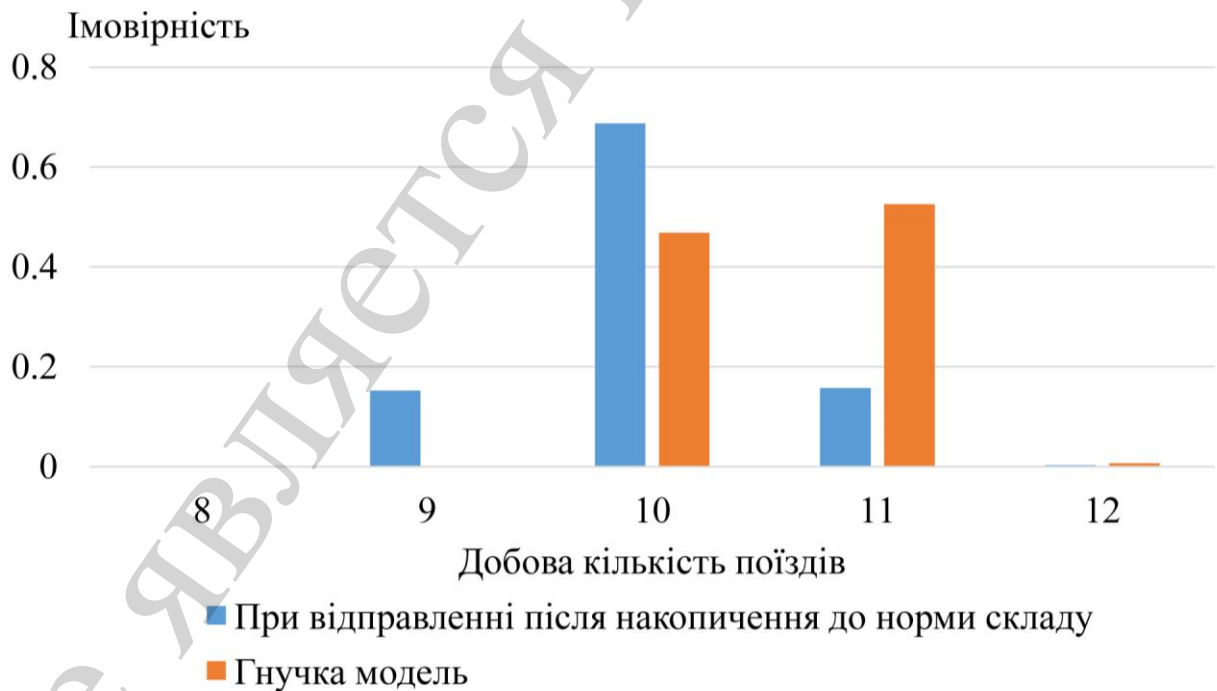


Рис. 4. Щільність розподілу імовірності добової кількості передавальних поїздів



Рис. 5. Щільність розподілу імовірності часу простою вагонів під накопиченням



Рис. 6. Формування черги з вагонів, що чекають відправлення з пунктів накопичення та формування складів передавальних поїздів

Для визначення розмірів збільшення добової кількості поїздів при організації передавальних поїздів за «жорстким графіком» проведено додаткову серію експериментів (рис. 7, табл. 1).



Рис. 7. Залежність середнього часу простою та обсягу черги вагонів під накопиченням від кількості додаткових поїздів (на добу) при організації передавальних поїздів за жорстким графіком

Кожний експеримент супроводжується відповідним збором, систематизацією та аналізом статистичних даних, та технологічних показників відповідних моделей організації передавальних поїздів. Зокрема визначається варіація обсягу черги з вагонів, що знаходяться у пунктах накопичення.

6. Обговорення результатів імітаційного моделювання організації передавальних поїздів у розвинутому залізничному вузлі

Моделюванням вдалося охопити всі варіанти організації передавальних поїздів, що використовуються на сьогодні, та потенційно можуть бути впроваджені у сучасних розвинутих транспортних вузлах.

При відправленні передавальних поїздів за жорстким графіком спостерігається різке зростання середнього простою вагонів під накопиченням (284,8 години, табл. 3), що свідчить про поступове зниження відмовостійкості залізничної технологічної системи. Таке явище може пояснюватись тим, що при відправленні за жорстким графіком існує висока імовірність відправлення поїздів у неповному складі, що, в межах кожної доби, при запланованих розмірах руху (дорівнює 9 на добу, табл. 3), не дозволяє вивезти всі вагони. Отже накопичення вагонів зростає «лавиноподібно» (рис. 6). Для забезпечення належного рівня технологічної надійності необхідно передбачувати додаткові (позапланові) передавальні поїзди, тобто збільшувати планові поїздопотоки. Так, експериментально встановлено, що при збільшенні добової кількості поїздів на один (на 11 %) та більше кожної доби, середній простій вагонів під накопиченням та розмір черги з вагонів у пункті накопичення зменшується до стандартних показників (рис. 7, табл. 1).

З іншого боку, розміри руху передавальних поїздів за жорстким графіком повинні визначатись не з умови повносоставних складів, тобто кількості вагонів, що відповідає нормі составу на даному залізничному напрямку. Враховуючи те, що розподіл добової кількості вагонів підпорядкований закону Пуассона, якій, як відомо, є близьким до симетричного, таким значенням розрахункової кількості вагонів у складі може виступати значення приблизно у половину норми. Тоді, результати моделювання відповідатимуть варіанту із додатковими чотирма поїздами щодоби (табл. 1) (рис. 7).

Експериментально встановлено, що при незмінних розмірах поїздопотуку (дев'ять на добу) самим раціональним варіантом організації передавальних поїздів є «гнучка модель» (варіант 4, табл. 1). При цьому варіанті середній простій під накопиченням вагонів зменшиться на 0,1 годину, що на рік становитиме в середньому 16,5 тис. годин. Враховуючи середню вартість вантажної маси для залізниці (185 USD за тону) та ставку рефінансування в Україні (18 % річних), загальна економія витрат складатиме близько 37 тис. USD на рік.

Слід зазначити, що даний спосіб організації передбачає «відправлення за готовністю», що в умовах інтенсивного руху поїздів у розвинених вузлах не завжди можливий (особливо в ранішній та вечірній часи пік з інтенсивним приміським та місцевим поїздопотуком). Тому, для розвинених залізничних вузлів, із інтенсивним рухом пасажирських поїздів, необхідні окремі дослідження.

7. Висновки

1. При різних моделях організації передавальних поїздів суттєво відрізняється тільки час знаходження вагонів під накопиченням. Тому, критерієм ефективності зазначеного процесу виступає середній час простою місцевого вагону під накопиченням, або сукупні вагоно-години під накопиченням.

2. Розроблені дискретно-подієві імітаційні моделі (*Java SE, Eclips, AnyLogic*) організації передавальних поїздів за «жорстким графіком» та за накопиченням до норми составів із можливістю їх одночасної комбінації. В моделях враховано стохастичну природу надходження вагонів у пункти накопичення та дотримання составів до встановленої норми. В моделях реалізовано об'єктно-орієнтований принцип, що забезпечує «пономерний» облік моментів часу фазового переходу кожної окремої заявки (вагону) під час всього процесу моделювання. Розроблені імітаційні моделі охоплюють всі варіанти організації передавальних поїздів, що використовуються на сьогодні, та потенційно можуть бути впроваджені у сучасних розвинених транспортних вузлах.

3. Експериментально встановлено, що найбільш ефективним, за критерієм мінімальних сукупних вагоно-годин простою під накопиченням, варіантом організації передавальних поїздів є комбінований варіант. При наявності достатньої кількості вагонів у пункті накопичення поїзд відправляється раніше (відправлення за накопиченням до норми). Інакше – через розрахунковий середній інтервал (варіант відправлення за жорстким графіком). Саме при такому способі отримано мінімальні сукупні вагоно-години під накопиченням при незмінних

параметрах технологічної системи: розмірів руху поїздів, потрібної пропускної та переробної спроможностей підсистем залізничного вузла.

Література

1. Optimization Methods for Multistage Freight Train Formation / Bohlin M., Gestrelus S., Dahms F., Mihalák M., Flier H. // *Transportation Science*. 2016. Vol. 50, Issue 3. P. 823–840. doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.2014.0580>
2. Matsiuk V. A study of the technological reliability of railway stations by an example of transit trains processing // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1, Issue 3 (85). P. 18–24. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91074>
3. Katsman M. D., Myronenko V. K., Matsiuk V. I. Mathematical models of ecologically hazardous rail traffic accidents // *Reliability: Theory & Applications*. 2015. Vol. 10, Issue 1 (36). P. 28–39. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/mathematical-models-of-ecologically-hazardous-rail-traffic-accidents>
4. Мацюк В. І. Дослідження технологічної надійності парків технічних станцій дискретно-подієвим моделюванням // *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології*. 2015. № 26-27. С. 268–272.
5. Improvement of the technology of accelerated passage of low-capacity car traffic on the basis of scheduling of grouped trains of operational purpose / Prokhorchenko A., Parkhomenko L., Kyman A., Matsiuk V., Stepanova J. // *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 149. P. 86–94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.111>
6. Скалозуб В. В., Іванов О. П., Швець О. М. Нечіткі моделі управління експлуатацією технічних систем для забезпечення стійкості залізничних перевезень // *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Транспортні системи та технології перевезень*. 2015. Вип. 9. С. 65–71.
7. Мурадян А. О. Разработка концепции игрового подхода к согласованию управления доставкой грузов с перевалкой в общетранспортных узлах // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 6, № 3 (78). С. 17–24. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.54273>
8. Chen C., Fang H., Xue F. Model and Algorithm of the Car-to-Block Assignment Plan on Railway Network // *ICLEM 2012*. 2012. doi: <https://doi.org/10.1061/9780784412602.0009>
9. Светашев А. А., Светашева Н. Ф. Процесс накопления вагонов на сортировочных станциях при твердом графике движения поездов // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2016. № 4. С. 117–123. doi: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2016-02-04-117-123>
10. Кудрявцев В. А., Светашев А. А. Процесс накопления вагонов на составы поездов // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2014. Вып. 3. С. 98–104.

11. Clausen U., Voll R. A comparison of North American and European railway systems // *European Transport Research Review*. 2013. Vol. 5, Issue 3. P. 129–133. doi: <https://doi.org/10.1007/s12544-013-0090-4>
12. Yaghini M., Momeni M., Sarmadi M. A hybrid solution method for fuzzy train formation planning // *Applied Soft Computing*. 2015. Vol. 31. P. 257–265. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.02.039>
13. Shramenko N. Y. Mathematical model of the logistics chain for the delivery of bulk cargo by rail transport // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. Issue 5. P. 136–141. doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/15>
14. Shramenko N., Muzylyov D., Karnaukh M. The principles of the choice of management decisions based on fuzzy logic for cargo delivery of grain to the sea-port // *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 7, Issue 4.3. P. 211–216.
15. Shramenko N. Y. Methodology for evaluation of synergy effect in terminal cargo delivery system // *Actual Problems of Economics*. 2016. Issue 8. P. 439–444.
16. Кудрявцев В. А., Светашев А. А. Снижение среднесуточных затрат вагоно-часов на накопление вагонов при формировании поездов по гибкой норме состава // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2015. Вып. 1. С. 26–34.
17. Мироненко В. К., Мацюк В. І. Визначення оптимального місця концентрації технічної переробки місцевого вагонопотоку в розвинених залізничних вузлах за критерієм мінімізації часу // *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології*. 2012. № 20. С. 246–253.