

ЛОМОТЬКО Д. В., д.т.н., професор,

АРСЕНЕНКО Д. В., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)

Створення ефективної технології формування залізничних маршрутів із зерновими вантажами за допомогою моделей на мережі Петрі

Запропоновано метод формалізації технології формування залізничних ступінчастих маршрутів із зерновими вантажами за допомогою моделей на мережі Петрі. Уперше для моделювання залізничних технологічних процесів перевезень у моделі застосовано гібридні мережі Петрі із синтез-дугами з динамічними вагами. Використання моделі передбачає забезпечення надання якісних послуг залізничним перевізником в умовах дефіциту зерновозів та тягового рухомого складу. Це дасть змогу скоротити загальний час прямування зернових вантажів залізницями.

Ключові слова: транспортна логістика, залізниця, ланцюг постачання, зерновий вантаж, ступінчаста маршрутизація, мережа Петрі.

Вступ

Сучасні тенденції розвитку залізничних перевезень та значні коливання обсягів навантаження зернових вантажів показують, що технологію перевезень останніх повинно бути оновлено з використанням логістичних принципів. Будь-яка корпорація здійснює торговельну взаємодію з усіма відкритими ринками, а тому ефективна, швидка та за можливості дешева доставка зернових вантажів – ключовий фактор для забезпечення стабільного прибутку. Зокрема в минулому році внаслідок відсутності гнучкого підходу до організації перевезення зернових вантажів у пунктах їх сезонної концентрації вітчизняною кукурудзою торгували майже на 20 % нижче середньої ціни на міжнародному ринку. Створення нового підходу сприятиме коректному прийняттю рішень перевізниками, трейдерами та операторами залізничної інфраструктури на базі інформаційних систем.

Постановка завдання

Сезон збору врожаю зернових цього року показав неспроможність своєчасного надання якісної транспортної послуги зернотрейдерам. Так, на початок листопада 2018 року інвентарними вагонами обслуговується лише 6,7 % елеваторів, що спроможні формувати відправницькі маршрути. Інші 93,3 % елеваторів неспроможні виконувати свої функції через незабезпечення рухомим складом та, як наслідок, через повне або часткове завантаження. Як результат, склалася ситуація неможливості обробки всього потоку зернових вантажів та наявність збитків для аграріїв і зернотрейдерів. Ключовим завданням із забезпечення перевізника якісною послугою залізничного транспорту згідно з вимогами Закону [1] є сприяння створенню умов для підтримки інвестиційних програм у транспортну галузь та економіку країни в цілому. Але забезпеченню з надання якісних послуг залізничним перевізником заважає дефіцит зерновозів та тягового рухомого складу на фоні збільшення обсягів наданих до перевезень зернових вантажів. Це призводить до непродуктивних простоїв вагонів під навантаженням, в очікуванні та під накопиченням на відправку. Зокрема у 2018 році один з найпотужніших у країні Степанівський елеватор (станція примикання Торопилівка, регіональна філія «Південна залізниця») має потужність зберігання 488 тис. т. Він здійснює навантаження маршрутів складом 54 ваг в середньому за 15 год. У той же час, наприклад, група із 17 зерновозів на станції Лихачове в середньому перебуває під навантаженням 24,2 год, окремий зерновоз на тій же станції – 29,7 год, а зерновоз на станції Савинці – 32 год. Ця ситуація є характерною для більшості станцій мережі та свідчить про необхідність

упровадження ефективних технологій роботи з вагонами, які завантажують зерновими вантажами, у напрямку поліпшення їх використання в часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В умовах реформування залізничної галузі [5] питання транспортного та логістичного обслуговування зернових вантажів набуває особливої актуальності. Вітчизняні вчені відмічають, що особливої ваги набуває питання якісного управління оператором як інвентарними, так і власними вагонами [10], з метою забезпечення навантажувальним ресурсом. Технологія перевезень зернових вантажів [6] має в собі цілу низку проблемних питань щодо взаємодії між переробними підприємствами та зернотрейдерами, формалізації та вирішення завдання розподілу навантажувального ресурсу [7], участі у логістичному ланцюзі інших видів транспорту, інтеграції в міжнародну транспортну мережу (TEN-T) в умовах використання сучасних складних інформаційних технологій. Напрямок розвитку перевезень зернових вантажів у США стало запровадження технології «човникових» поїздів, яка передбачає використання спеціальних низьких тарифів (на 46–52 % порівняно із звичайними) за умови навантаження поїзда складом у 75–120 ваг протягом обмеженого часу, як правило, до 15 год [11]. Наявність дефіциту рухомого складу призводить до необхідності пошуку особливих технологічних рішень для його подолання, а саме використання мультимодальних транспортних засобів та контейнерів [9].

Визначення мети та задачі дослідження

У зв'язку з вищенаведеним виникає необхідність вирішення науково-прикладного завдання створення ефективної логістичної технології залізничних перевезень зернових вантажів ступінчастими маршрутами [8] на полігоні, яке за допомогою математичних моделей може бути інтегровано в єдине інформаційне середовище.

Створення логістичної моделі технології формування відправок зернових вантажів передбачає отримання ефекту:

- від скорочення порожнього пробігу вагонів та підвищення маршрутної швидкості доставки вантажу в порт;
- створення умов для недискримінаційного доступу до рухомого складу, засобів та місць навантаження;
- створення єдиного інформаційного середовища для всіх учасників перевезення.

Основна частина

Процес прийняття технологічних рішень [9] щодо оптимізації перевезення зернових вантажів повинен урахувати природу вантажоутворення: у сучасних умовах ця номенклатура є невід'ємною складовою у формуванні загальних економічних тенденцій у країні, тому, окрім відомих сезонних коливань, слід урахувати договірні зобов'язання трейдера, експортера, зміни вартості вантажу тощо.

Основним способом перевезення зернових вантажів залізницями стає маршрутна відправка, але на мережі існує велика кількість станцій, що мають невеликі обсяги навантаження. Для охоплення цих обсягів «класична» технологія формування маршрутів стає малоефективною. Основні варіанти формування маршрутної відправки є відправницькі та технологічні маршрути, які передбачають масове навантаження, як правило, на одній станції. З метою охоплення станцій з невеликими обсягами навантаження пропонується використовувати удосконалену технологію формування ступінчастих маршрутів таких видів [2]:

- ступінчастий маршрут із формуванням партії вантажу на залізничному полігоні з подальшим розпиленням у припортовому районі;
- ступінчастий маршрут із формуванням партії вантажу на станції (пункті концентрації, маршрутній базі) з подальшим розпиленням у припортовому районі.

З метою створення ефективної технології використання ступінчастих маршрутів обрано як дослідний реальний полігон регіональної філії «Південна залізниця» з п'яти станцій, динаміку обсягів навантаження зернових вантажів на яких наведено на рис. 1. Математичне очікування навантаження полігона становить 504 ваг/міс, коефіцієнт нерівномірності 1,43. Географічний аналіз пунктів вантажоутворення, навантажувальні можливості вантажних станцій, технологічні можливості забезпечення вагонами та тяговим рухомим складом дають можливість застосування ступінчастих маршрутів, але обґрунтування її ефективності запропоновано формалізувати за допомогою моделі на мережі Петрі.

Гібридні дискретні мережі Петрі реалізуються подіями та умовами, які подано абстрактними символами з двох алфавітів, що не перетинаються та які називаються відповідно множиною переходів і множиною позицій [3]. Умови-позиції і події-переходи мають безпосередній причинно-наслідковий зв'язок, який зображується за допомогою спрямованих дуг, що ведуть з позицій у переходи і з переходів у позиції. Позиції, з яких ведуть дуги на перехід, є його вхідними позиціями, а позиції, на які ведуть дуги з переходу, – вихідними позиціями. Стисла характеристика елементів мережі Петрі наведена в табл. 1.

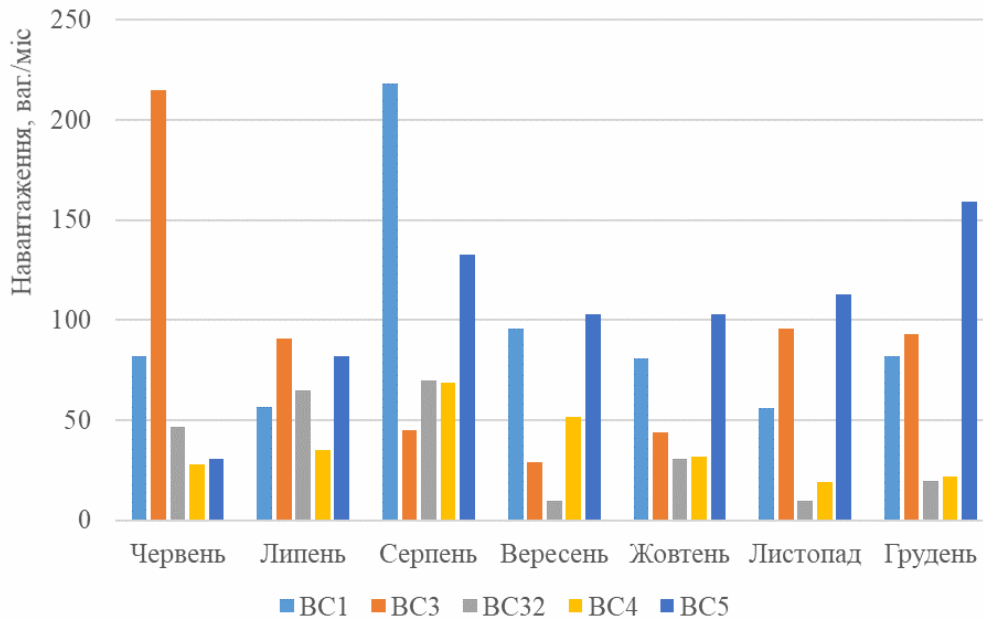


Рис. 1. Динаміка навантаження зернових вантажів на дослідному залізничному полігоні

Таблиця 1

Стисла характеристика елементів гібридної мережі Петрі

Графічне позначення	Назва	Коротка характеристика
P 	Позиція	Позиція характеризує деякий стан системи. При цьому P – назва переходу; $m1$ – маркування позиції
T 	Перехід	Перехід визначає перехід маркування системи з однієї позиції в іншу. При цьому T – назва переходу; 0 – час затримки спрацьовування переходу $t_{затр}$
	Синтез-дуга	Спрямована дуга з'єднує перехід і позицію або позицію і перехід. Цифра визначає вагу дуги
	Дуга-інгібітор	Спрямована дуга, що з'єднує позицію з переходом і не дозволяє переміщення маркерів через перехід. Цифра визначає вагу дуги
	Тест-дуга	Спрямована дуга з'єднує перехід з позицією і дозволяє встановити умову спрацьовування переходу. Цифра визначає вагу дуги

Структура моделі на мережі Петрі в канонічному вигляді задана сукупністю множин

$$C = \{P, T, I, O, F, M0\}, \quad (1)$$

де P – кінцева множина позицій;
 T – кінцева множина переходів;
 I – множина вхідних дуг (вхідна функція);

O – множина вихідних дуг (вихідна функція);
 F – множина часу затримки спрацьовування переходу;
 M_0 – початкове маркування мережі.
 При цьому множини переходів і позицій не перетинаються, тобто

$$P \cap T = \emptyset. \quad (2)$$

У той же час

$$\begin{aligned}
 P &= \begin{pmatrix} P_1 & T_1 & k_{11} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_i & T_j & k_{ij} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_n & T_m & k_{nm} \end{pmatrix}; T = \begin{pmatrix} T_1 & P_1 & k_{11} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_i & P_j & k_{ij} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_m & P_n & k_{mn} \end{pmatrix}; I = \begin{pmatrix} s_1 & g_1 & e_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ s_i & g_i & e_i \\ \dots & \dots & \dots \\ s_m & g_m & e_m \end{pmatrix}; \\
 O &= \begin{pmatrix} s_1 \\ \dots \\ s_i \\ \dots \\ s_m \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \dots \\ \tau_i \\ \dots \\ \tau_m \end{pmatrix}; M_0 = \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \dots \\ \mu_i \\ \dots \\ \mu_n \end{pmatrix},
 \end{aligned} \tag{3}$$

де n, m – відповідно кількість позицій і переходів;

k – вага відповідних дуг;

s_i – кількість синтезуючих дуг, що входять в i -й перехід (для множини I) або виходять з i -го переходу (для множини O);

g_i – кількість інгібторних дуг, що входять в i -й перехід;

e_i – кількість тестових дуг, що входять в i -й перехід;

μ_i – маркування i -ї позиції.

Перехід T_i вважаємо дозволеним у момент $t_{зроб}$ для всіх позицій P_j , якщо для всіх синтезуючих і тестових дуг у момент $t_{замр}$, що входять у нього, виконується умова

$$\mu(P_j) \geq \#(P_j, I(T_i)), \tag{4}$$

а для інгібторних дуг

$$\mu(P_j) = 0, \tag{5}$$

і при цьому

$$t_{зроб} = \tau_i + t_{замр}. \tag{6}$$

Маркування кожної позиції мережі змінюється за таким правилом:

$$\mu_{k+1}(P_j) = \mu_k(P_j) - I(T_i) + O(T_i). \tag{7}$$

Розглянутий вид мереж Петрі дає змогу враховувати специфіку логістичних потоків за рахунок урахування такої їх властивості, як дискретність кількості вагонів, локомотивів та навантажувальних засобів. З урахуванням цього пропонується розв'язати

задачу формування відправок зернових вантажів залізничним транспортом на полігоні за рахунок створення моделі технологічної взаємодії між учасниками перевезень на базі логістичних технологій.

На рис. 2 подано загальний вигляд моделі технології формування залізничних ступінчастих маршрутів для перевезень зернових вантажів, створеної за допомогою гібридної мережі Петрі.

Модель виконано за блочною схемою – окремі технологічні блоки (вантажна станція, дільниця обслуговування, локомотивне господарство) дають змогу поширювати модель на інші полігони. У моделі зроблено припущення, що всі вагони під навантаження є вагонами одного типу, а обсяги навантаження кожної станції відповідають їх математичному очікуванню.

З метою виключення неоднозначності у функціонуванні моделі та підвищення її стійкості до зациклення у моделі використано дуги-інгібтори, що дало змогу уникнути перехідних інваріантів [4]. Виключення наявності позиційних інваріантів визначається властивістю зберігання мережі. Це досягнуто за допомогою використання синтез-дуг із динамічними вагами (наприклад між переходом $T3$ та позицією $P4$), що вперше застосовується для моделювання технологічних процесів залізничних перевезень масових вантажів. Дійсно, після закінчення моделювання існує рівність початкового та фінального маркування мережі, тобто адекватність моделі також підтверджується властивістю зберігання мережі-моделі.

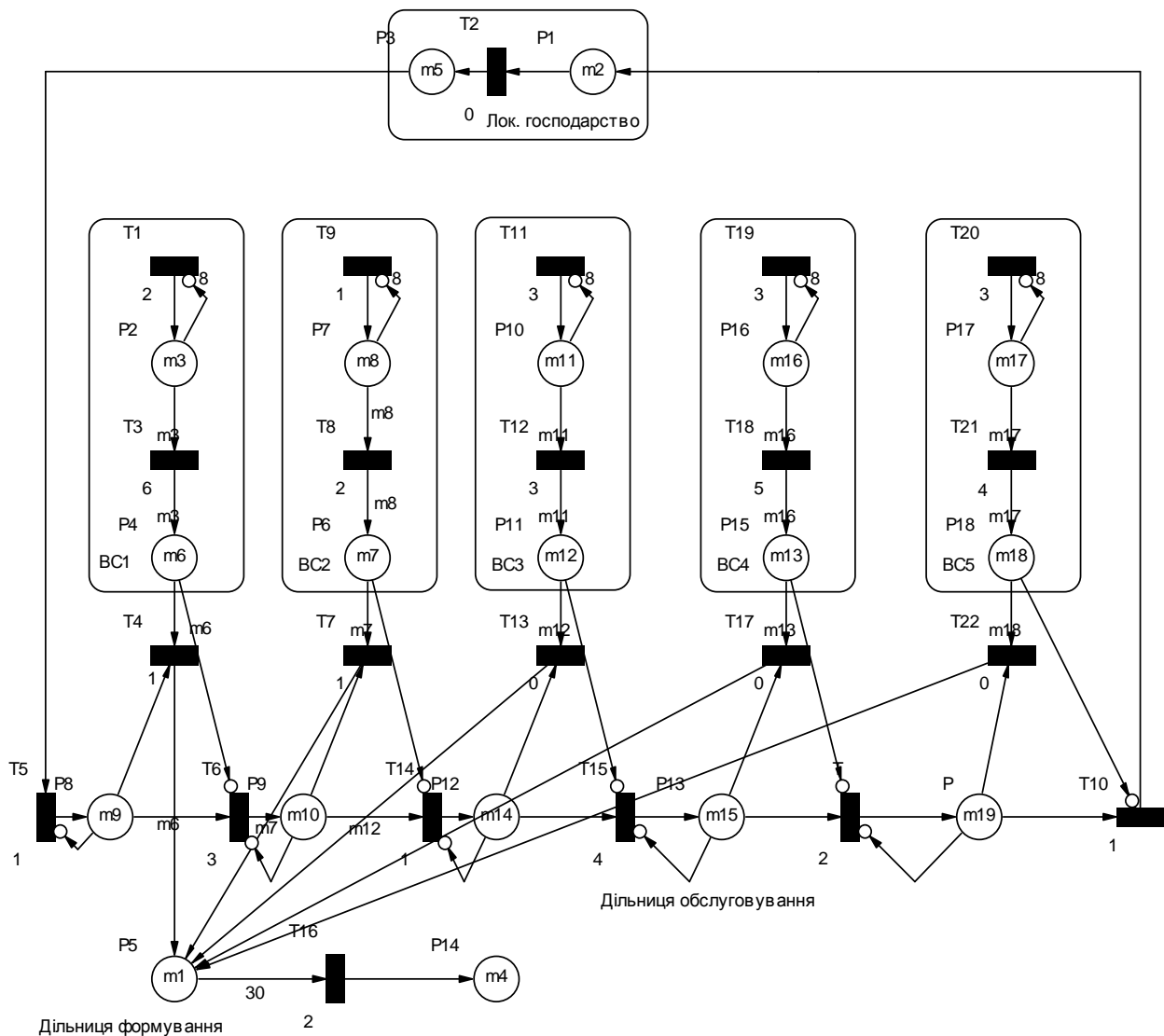


Рис. 2. Загальний вигляд моделі технології формування залізничних ступінчастих маршрутів зернових вантажів на мережі Петрі

Здійснено моделювання технології формування ступінчастого маршруту на дослідному полігоні для різного його складу m_m , результати моделювання наведено на рис. 3.

Аналіз технологічних варіантів, що зведено до табл. 2, показав, що при незначній різниці у тривалості середнього простою місцевого вагона при складі маршруту $m_m = 40$ ваг та $m_m = 45$ ваг (на 0,2 год) на 26 % зростають непродуктивні простоя вагонів під очікуванням операцій та під накопиченням як залишкові групи. Тобто економія вагоно-годин простою місцевих вагонів при $m_m = 40$ «перекривається» непродуктивними простоями та становить 20,1 ваг.год/маршрут, а інші технологічні

варіанти ($m_m = 50$, $m_m = 55$) з цього погляду ще гірші. Таким чином, раціональним на цьому полігоні можливо вважати варіант ступінчастого маршруту при $m_m = 45$ ваг при середньому часі на формування маршруту 57 год.

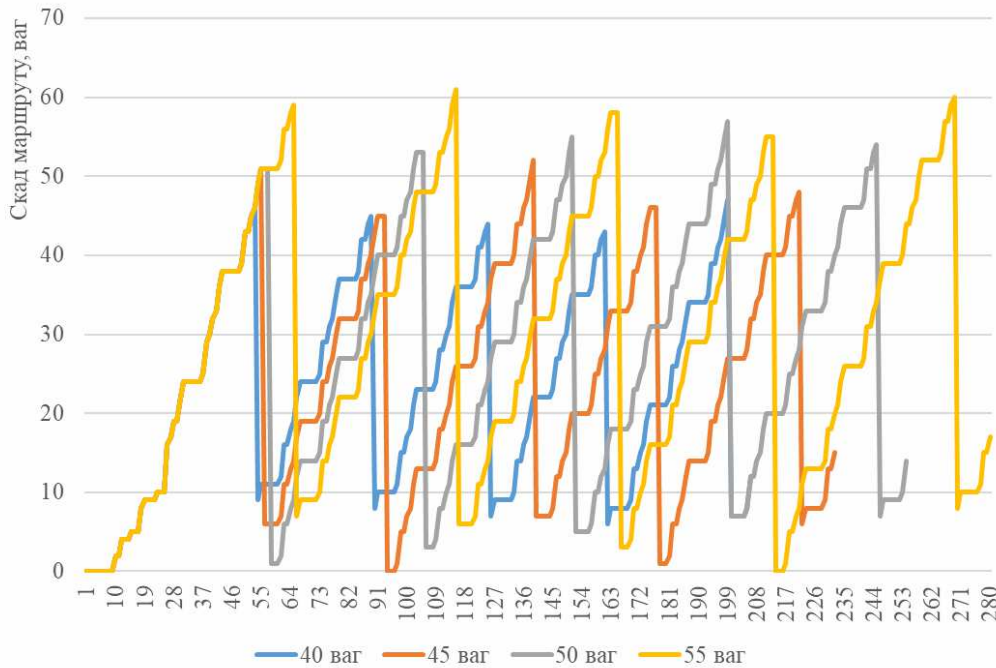


Рис. 3. Результати моделювання накопичення вагонів на ступінчастий маршрут різного складу на дослідному полігоні

Таблиця 2

Аналіз результатів моделювання

Показник	Склад маршруту			
	40	45	50	55
Склад маршруту m_m , ваг	40	45	50	55
Загальні вагоно-години накопичення	4646	5275	6552	7923
Вагоно-години накопичення на маршрут	929,2	1055,0	1310,4	1584,6
Середній час на формування маршруту, год	55	57	59	67
Середній простій місцевого вагона, год	23,2	23,4	26,2	28,8
Вагоно-години додаткового непродуктивного простою вагонів	779	574	895	868
Питомий непродуктивний простій на відправлений маршрут, ваг.год	20,1	13,3	18,4	16,3
Відносна ефективність технології порівняно з раціональною	0,66	1,0	0,72	0,82

Висновки

Результати моделювання довели існування раціонального технологічного варіанта формування ступінчастого маршруту із зерновими вантажами на дослідному полігоні при $m_m = 45$ ваг для розглянутого реального полігона. Аналіз показує, що можливе існування кращого, ніж запропонований, технологічного варіанта при збільшенні складу маршруту, але на m_m діє обмеження за корисною довжиною колій та тягою поїзної локомотива. Запропонований підхід до формування технології

маршрутних відправок зернових вантажів дає змогу врахувати інтереси всіх учасників перевезення, інтегрувати їх до єдиного інформаційного середовища та забезпечити покращення ефективності перевезень порівняно з існуючими технологіями. У перспективі це дає змогу створити технологічну карту [10] маршрутної відправки зернових вантажів у реальному масштабі часу, яка в єдиному інтелектуальному інформаційному середовищі дасть змогу здійснити прогнозування підходу маршрутів до пункту призначення та скоротити загальний час прямування зернових вантажів залізницями.

Список використаних джерел

1. Про залізничний транспорт [Електронний ресурс] : закон України від 04 липня 1996 року №273/96 (із змінами та доповненнями). – Режим доступу : <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/273/96-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 06.01.2018).
2. Ломотко, Д. В. Підхід до моделювання технології перевезень зернових вантажів за допомогою мереж Петрі [Текст] / Д. В. Ломотко, Д. В. Арсененко, А. О. Маслюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Тези доповідей 31-ї Міжнародної науково-практичної конференції. – 2018. – №4 (додаток). – С. 3-4.
3. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем [Текст] / Дж. Питерсон. – М. : Мир, 1984. – 246 с.
4. Liu N.K., Dillon T. An approach towards the verification of expert systems using numerical Petri nets [Text] // Int. J. of Intelligent Systems. – 1991. – vol. 6. – P. 255-276.
5. Cong Wang, Hangjun Yang, Hang Yuan. The impact of railway reform on corporate export: The case of China // Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 118, 2018, P. 627-647. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.013>.
6. Deqiang Li, Laijun Zhao, Chenchen Wang, Wenjun Sun, Jian Xue, Selection of China's imported grain distribution centers in the context of the Belt and Road initiative // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 120, 2018. – P. 16-34. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.10.007>.
7. Okan Örsan Özener, Solving the integrated shipment routing problem of a less-than-truckload carrier, Discrete Applied Mathematics, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.dam.2017.11.034>.
8. Huayi Chen, Tiejun Ma, Technology adoption with limited foresight and uncertain technological learning, European Journal of Operational Research, Volume 239, Issue 1, 2014, P. 266-275. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.03.031>.
9. Коробйова, Р. Г. Внедрение бимодальных технологий перевозки зерновых грузов в Украине [Текст] / Р. Г. Коробйова, Р. Ш. Рустамов, С. В. Гревцов // Транспортные системы и технологии перевозок. – 2015. – № 9. – С. 29-34.
10. Кулешов, В. В. Удосконалення технології перевезень парком вагонів операторських компаній на станціях вузла [Текст] / В. В. Кулешов, О. Ю. Толбатов, Т. Р. Чурилик // 36. наук. праць Укр. держ. академії залізнич. трансп. – Харків : УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 135. – С. 107-111.
11. Ndembe, E. Hard Red Spring Wheat Marketing: Effects of Increased Shuttle Train Movements on Railroad Pricing in the Northern Plains [Text] / E. Ndembe // Journal of the Transportation Research Forum. – 2015. – Vol. 54, № 2. – P. 101-115.

Ломотко Д. В., Арсененко Д. В. Создание эффективной технологии формирования железнодорожных маршрутов с зерновыми грузами с использованием моделей на сети Петри.

Аннотация. Предложен метод формализации технологии формирования железнодорожных ступенчатых маршрутов с зерновыми грузами с помощью моделей на сети Петри. Впервые для моделирования железнодорожных технологических процессов перевозок в модели применены гибридные сети Петри с синтез-дугами с динамическими весами. Использование модели предусматривает обеспечение предоставления качественных услуг железнодорожным перевозчиком в условиях дефицита зерновозов и тягового подвижного состава. Это позволит сократить общее время следования зерновых грузов железными дорогами.

Ключевые слова: транспортная логистика, железная дорога, цепь поставок, зерновой груз, ступенчатая маршрутизация, сеть Петри.

Denis Lomotko, Danila Arsenenko. Creating an effective technology for the formation railway routes with grain cargoes using models on the Petri net.

Abstract. The method of formalization technology of formation railway routes with grain cargoes with the models on Petri's nets is proposed. For the first time, modeling of railway technological processes of transportation in the model was used hybrid Petri nets with synthesis arcs with dynamic weights. The use of the model involves ensuring the provision of quality services by a railway carrier in the conditions of a shortage of grain carriers and traction rolling stock.

Creation of a logistic model of the technology of forming grain deliveries in the form of stepped routes will get the effect of reducing the empty running of cars. Due to this, it is possible to increase the speed of delivery of cargo to the port, create conditions for non-discriminatory access to rolling stock and loading facilities. In the long run, this enables the creation of a technological carts of the routing of grain cargoes in real time, which, in a single intelligent information environment, will reduce the total time of traversing grain cargoes by railroads.

Keywords: transport logistics, railroad, supply chain, grain cargo, stepwise routing, Petri net.

Надійшла 19.11.2018 р.

Ломотько Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: den@kart.edu.ua ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-7624-2925> Scopus ID 57190438925

Арсененко Данила Володимирович, аспірант, кафедра «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: TSL@kart.edu.ua

Denis Lomotko, Doctor of engineering, professor department of Transport system and Logistic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: den@kart.edu.ua ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-7624-2925> Scopus ID 57190438925

Danila Arsenenko, postgraduate student; department of Transport system and Logistic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: TSL@kart.edu.ua