

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

УДК 656.2

Т. В. БУТЬКО<sup>1\*</sup>, В. М. ПРОХОРОВ<sup>2\*</sup>, Д. М. ЧЕХУНОВ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 89, ел. пошта butko@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-1082-599X

<sup>2\*</sup>Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 88, ел. пошта vicmmx@gmail.com, ORCID 0000-0001-8963-6467

<sup>3\*</sup>Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 88, ел. пошта cdm2017@meta.ua, ORCID 0000-0002-1570-6351

### ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ СОРТУВАЛЬНИМИ СТАНЦІЯМИ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ НА ОСНОВІ БАГАТОЦІЛЬОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

**Мета.** У науковій роботі передбачається формалізувати процес побудови плану оперативної роботи сортувальної станції в умовах обробки вагонопотоків із небезпечними вантажами. Розроблену математичну модель необхідно реалізувати у вигляді системи інтелектуального планування, яка дозволить мінімізувати як експлуатаційні витрати, так і технологічні ризики в процесі роботи сортувальної станції. **Методика.** Проведено аналіз сучасних підходів у моделюванні процесів управління транспортними системами в умовах ризику. Сформовано математичну модель, яка у своєму складі містить цільову функцію технологічних витрат, пов'язаних зі всіма основними технологічними операціями, які виконуються на сортувальній станції: приймання, розформування, формування й відправлення поїздів, накопичення вагонів, обробка поїздів, що містять вагони з небезпечними вантажами, операції з місцевими вагонами. Крім того, модель також містить цільову функцію експозиції ризику, яка також потребує мінімізації з метою максимального зменшення ризиків виникнення аварій та їх наслідків під час оперування вагонами з небезпечними вантажами. Для оптимізації моделі необхідні певні умови, які відповідають технологічним особливостям роботи сортувальної станції та які були формалізовані у вигляді системи обмежень. Оптимізацію моделі запропоновано здійснювати з використанням методів багатоцільової оптимізації на основі генетичного алгоритму спеціального типу. **Результати.** Сформовано математичну модель, яка дозволяє в автоматизованому режимі будувати оперативний план роботи сортувальної станції з одночасним урахуванням двох критеріїв: експлуатаційні витрати й експозиція ризику. Модель було реалізовано у складі створеного програмного продукту, з використанням якого було проведено моделювання. **Наукова новизна.** Розроблена технологія інтелектуального планування, яка використовує методи багатоцільової оптимізації й дозволяє знаходити компромісне рішення, одночасно враховуючи як експлуатаційні витрати, так і експозиції ризику в умовах обробки вагонопотоків із небезпечними вантажами. **Практична значимість.** У ході моделювання було виявлено, що ефективність запропонованої технології інтелектуального планування на основі розробленої моделі порівняно з традиційною технологією планування становить близько 6,5 % за критерієм експлуатаційних витрат і близько 8 % за критерієм експозиції ризику.

**Ключові слова:** інтелектуальне управління сортувальними станціями; багатоцільова оптимізація; обробка вагонопотоків із небезпечними вантажами

## Вступ

Обсяги перевезень небезпечних вантажів (НВ) залізницями країн світу постійно збільшуються, але темпи їх зростання в Україні є ще більшими. Слід зазначити, що понад 70 % від загального часу обігу вантажні вагони, серед яких і вагони з НВ, перебувають на технічних станціях, зокрема на сортувальних станціях (СС).

Крім того, із вагонами з НВ на СС здійснюються технічні операції, під час виконання яких ризик виникнення аварій значно підвищується. Таким чином, СС є об'єктами підвищеної небезпеки, особливо враховуючи й те, що на них можуть одночасно обробляти вагони з різними типами НВ й у значних кількостях.

Підвищений рівень небезпеки під час оперування вагонами з НВ пов'язаний не лише з високим рівнем імовірності виникнення аварій, але й із масштабами їх можливих наслідків. СС зазвичай розташовані поблизу мегаполісів або великих населених і промислових пунктів. Крім того, саме вони є важливими об'єктами залізничної інфраструктури, вихід із ладу яких може значно ускладнити роботу всієї залізничної мережі.

Стан упровадження інформаційних технологій під час організації роботи СС на даному етапі не дозволяє відмовитись від традиційної технології оперативного управління. Етапи вироблення й прийняття управлінських рішень залишаються за керівним персоналом станцій. Такий підхід вимагає наявності значного досвіду під час виконання обов'язків маневрових диспетчерів. Проте він також не виключає ймовірності помилки, пов'язаної з людським фактором, особливо в умовах, коли робоча зміна триває протягом 12 годин.

Таким чином, неякісне оперативне планування може не лише безпосередньо впливати на ймовірність виникнення аварій із вагонами з НВ, але й призводити до збоїв і заторів на станції, наслідком яких може бути збільшення часу перебування вагонів із НВ на СС.

Отже, упровадження сучасних автоматизованих, зокрема інтелектуальних, систем управління надскладними в технологічному плані підсистемами залізничної системи, якими є со-

ртувальні станції (СС), – це нагальна вимога часу.

Одним із головних завдань оперативного управління в системі вантажних залізничних перевезень є оперативне планування роботи СС, суть якого полягає не лише в підготовці виконання планових обсягів робіт із розформування, формування поїздів, обробки місцевих вагонів тощо, але й у забезпеченні виконання всіх цих операцій із мінімальними експлуатаційними витратами й високим рівнем технологічної безпеки. Тобто важливим моментом під час формування інтелектуальної системи є можливість управління ризиками.

Формалізація технологічних процесів сортувальних станцій із метою побудови систем управління є актуальною темою наукових досліджень. Як довів аналіз, основна активність дослідників спрямована на створення моделей на основі теорії масового обслуговування. Так, в [11] описаний програмний продукт, який використовують для симуляції роботи сортувальних станцій. Цей продукт, безумовно, є корисним на стадії проектування СС, однак у питаннях оперативного управління він може бути корисним лише для пошуку стратегій управління, якщо відомий характер вхідного поїздопотоку. Отже, оперативний план роботи СС, який відповідає конкретному набору вихідних даних, за допомогою таких моделей отримати неможливо. У [6] запропоновано математичну модель для вирішення задачі оптимізації процесу сортування вагонів, яка сформульована як задача лінійного програмування великої розмірності, а також зазначено спосіб її оптимізації на основі методу генерації стовпчиків. У [7] задача оптимального сортування вагонів представлена як задача фарбування інтервальних графів. У [9] запропоновані алгоритми багато-стадійного сортування вагонів на СС та оцінена їх обчислювальна складність, доведено, що задача багатостадійного сортування в загальному вигляді може бути зведена до задачі 3-задовільності з не всіма рівними елементами (англ. not all equal 3-satisfiability problem), яка є NP-повною з точки зору теорії обчислювальної складності. Загальним недоліком цих і переважної більшості інших публікацій є те, що вони концентрують увагу на процесі розформування-формування составів, який розглядають ізольовано від інших станційних процесів. Зо-

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

всім не досліджена місцева робота станцій, яка може становити значну частку від усієї роботи, не розглянуті процеси обробки вагонів із НВ та ризику, що пов'язані з ними.

**Мета**

Основною метою роботи є розробка математичної моделі, яка дозволить побудувати інтелектуальну систему управління оперативною роботою СС і буде спроможна мінімізувати сумарні експлуатаційні витрати й одночасно забезпечити прийнятний рівень ризику під час

розформування-формування поїздів, що включають вагони з НВ, а також під час виконання технологічних операцій з ними на території станції.

**Методика**

Як було зазначено в [1], для того щоб розроблений план оперативної роботи сортувальної станції під час оперування вагонами з небезпечними вантажами відповідав максимально-му рівню безпеки, необхідно мінімізувати цільову функцію експозиції ризику:

$$\mathcal{E}(x) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^{N_{II}} \sum_{k=1}^{N_B} \left( \xi_{ij} H(t - t_{jx}^{II}) \times \zeta_{ik} H(t_{kx}^B - t) \times \gamma Q_i(t) \times L_i \right),$$

де  $x$  – вектор керівних змінних, який містить дані про порядок розгляду виконання операцій на СС;  $W$  – потужність множини вагонів, яку розглядають протягом планового періоду;  $N_{II}$  – потужність множини поїздів, що прибувають на станцію протягом планового періоду;  $N_B$  – потужність множини поїздів, які відправляють зі станції протягом планового періоду;  $\xi_{ij}$  – функція, що приймає значення 1, якщо  $i$ -й вагон прибув на станцію у складі  $j$ -го поїзда, або значення 0 в іншому випадку;  $\zeta_{ik}$  – функція, що приймає значення 1, якщо  $i$ -й вагон був відправлений зі станції у складі  $k$ -го поїзда, або значення 0 в іншому випадку;  $t$  – поточне значення часу у хвиликах;  $t_{jx}^{II}$  – час прийняття на станцію  $j$ -го поїзда;  $t_{kx}^B$  – час відправлення зі станції  $k$ -го поїзда;  $Q_i(t)$  – поточне значення функції ймовірності виникнення аварії з  $i$ -им вагоном, яке можна отримати за допомогою моделі на основі Басової мережі, що також включає нечіткі елементи [1];  $\gamma$  – коефіцієнт нормалізації ймовірностей;  $T$  – часовий горизонт планування;  $H$  – функція Гевісайда, яка визначена наступним чином:

$$H(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ 1, & z \geq 0 \end{cases}$$

Поточне значення функції ймовірності виникнення аварії визначають за допомогою Бас-

сової мережі [1]. Такий підхід дає можливість використовувати не лише статистичні дані, але й актуальну інформацію про безпосередній перебіг технологічних процесів і стан об'єктів на станції.

Однак первинною задачею оперативного планування роботи СС є забезпечення виконання завдань на плановий період у повному обсязі за мінімального рівня експлуатаційних витрат. Ураховуючи те, що досягнення мінімуму експозиції ризику є практично неможливим за одночасного досягнення мінімуму експлуатаційних витрат, тобто наявність певного рівня конфлікту цих двох критеріїв, наступним кроком у вирішенні задачі автоматизації побудови плану оперативної роботи СС є створення математичної моделі, яка б одночасно включала цільову функцію експозиції ризику та цільову функцію експлуатаційних витрат із подальшою їх сумісною мінімізацією засобами векторної оптимізації.

Сортувальна станція – складна система, у технологічний процес якої включені десятки операцій, необхідних для забезпечення виконання планових обсягів робіт із розформування, формування та обробки поїздів. Одними з найважливіших чинників, які впливають на процес планування, є технолого-економічні. Крім того, процес оперативного планування потребує інформації про час прибуття і склад поїздів [9, 5]. Таким чином, цільову функцію, що відповідає критерію експлуатаційних витрат, можна представити в наступному вигляді:

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

$$\begin{aligned}
C(x) = & e_{\sigma, z} \left( \sum_{i=1}^{N_{II}} (T - t_{ix}^{II}) m_i^{II} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{q_i^{npub}} (T - t_{ij}^{npub}) m_{ij} - \sum_{i=1}^{N_B} (T - t_{ix}^B) m_i^B \right) + \\
& + e_{\lambda, z} \left( \sum_{i=1}^{N_{III}} (T - t_i^{III}) + \sum_{i=1}^{N_{II}} (T - t_{ix}^{II}) - \sum_{i=1}^{N_B} (T - t_{ix}^B) - \sum_{i=1}^{N_{BII}} (T - t_i^{BII}) \right) + \\
& + e_{n, z} \sum_{i=1}^{N_{II}} (t_{ix}^{II} - t_i^n) + e_{\lambda, z} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{q_i^{nod}} (2a_i + b_i \cdot \min(m_{ijx}, m_i^{\max}) + \tau_i^{\sigma idy}) + \\
& + e_{\lambda, z} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{q_i^{npub}} (2a_i + b_i \cdot m_{ij} + \tau_i^{npuy}) + e_{n, z} \left( \sum_{i=1}^{N_{II}} (t_{ix}^{nkmolII} - t_{ix}^{II}) + \sum_{i=1}^{N_B} (t_{ix}^B - t_{ix}^{nkmolB}) \right),
\end{aligned}$$

де  $e_{\sigma, z}$  – вартість однієї вагоно-години;  $t_{ix}^{II}$  – момент часу приймання  $i$ -го поїзда на станції;  $m_i^{II}$  – кількість вагонів в  $i$ -му поїзді, що прибуває до станції;  $t_{ix}^B$  – момент часу відправлення  $i$ -го поїзда зі станції;  $m_i^{II}$  – кількість вагонів у  $i$ -му поїзді з множини поїздів, що прибувають;  $m_i^B$  – кількість вагонів у  $i$ -му поїзді з множини поїздів, які відправляються;  $e_{\lambda, z}$  – вартість однієї локомотиво-години;  $N_{III}$  – потужність множини локомотивів, що були спрямовані на сортувальну станцію в порядку виконання регулювальних заходів;  $t_i^{III}$  – момент часу прибуття на станцію  $i$ -го локомотива в порядку виконання регулювальних заходів;  $N_{BII}$  – потужність множини локомотивів, які були відправлені зі станції у порядку виконання регулювальних заходів;  $t_i^{BII}$  – момент часу відправлення зі станції  $i$ -го локомотива в порядку виконання регулювальних заходів;  $e_{n, z}$  – вартість однієї поїздо-години;  $t_i^n$  – час прибуття  $i$ -го поїзда до вхідного світлофора станції;  $K$  – потужність множини під'їзних колій підприємств, які обслуговують маневрові локомотиви станції;  $q_i^{nod}$  – кількість подавань груп вагонів на вантажний фронт  $i$ -го підприємства в межах горизонту планування;  $a_i$  – константа формули Фролова, яка відповідає базовій частині часу виконання напіврейсу подавання-прибирання вагонів на вантажний фронт  $i$ -го підприємства, що залежить від довжини його під'їзної колії;

$b_i$  – константа формули Фролова, яка відповідає частині часу виконання напіврейсу подавання-прибирання вагонів на вантажний фронт  $i$ -го підприємства, що залежить від довжини його під'їзної колії та кількості вагонів під час подавання-прибирання;  $m_{ijx}$  – загальна кількість вагонів, які накопичені на виділеній колії станції для подавання на вантажний фронт  $i$ -го підприємства на момент початку  $j$ -ї подачі;  $m_i^{\max}$  – максимально можлива кількість вагонів для подавання на вантажний фронт  $i$ -го підприємства, що обмежена його місткістю;  $\tau_i^{\sigma idy}$  – час, який витрачений на відчеплення групи вагонів під час здійснення подавання на вантажний фронт  $i$ -го підприємства;  $q_i^{npub}$  – кількість прибирань груп вагонів із вантажного фронту  $i$ -го підприємства в межах горизонту планування;  $m_{ij}$  – чисельність групи вагонів у  $j$ -му прибиранні з вантажного фронту  $i$ -го підприємства для їх подальшої переробки на станції;  $\tau_i^{npuy}$  – час, витрачений на причеплення групи вагонів під час здійснення їх прибирання з вантажного фронту  $i$ -го підприємства;  $t_{ij}^{npub}$  – момент часу закінчення виконання операції  $j$ -го прибирання групи вагонів із вантажного фронту  $i$ -го підприємства;  $t_{ix}^{nkmolII}$  – час початку виконання комплексного огляду  $i$ -го поїзда в парку прийняття;  $t_{ix}^{nkmolB}$  – час початку виконання комплексного огляду  $i$ -го поїзда в парку відправлення.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Перший доданок цільової функції представляє витрати, пов'язані із загальним часом перебування вагонів на території СС. Він враховує вагоно-години простою кожного вагона, визначаючи загальний час його перебування на СС як різницю між моментом часу відправлення поїзда, у складі якого цей вагон залишає станцію, і моментом часу прибуття поїзда, у складі якого цей вагон потрапляє на станцію. Перший доданок включає три елементи. Перший елемент зі знаком плюс, він додає до загальної кількості вагоно-годин ті, що відповідають вагонам у складі поїздів у моменти їх прибуття на станцію за принципом мережевого числення. Другий елемент також зі знаком плюс, він додає до загальної кількості вагоно-годин ті, що відповідають вагонам, які накопичуються на колії станції для подальшої переробки після їх прибирання з вантажних фронтів тих підприємств, під'їзні колії яких примикають до станції, у момент завершення операції прибирання. Третій елемент зі знаком мінус, він віднімає від загальної кількості вагоно-годин ті, що відповідають вагонам у складі поїздів, які відправляють зі станції, у моменти їх відправлення за принципом мережевого числення. Таким чином, враховується не лише простій під накопиченням, але й загальний час перебування вагонів на станції, у тому числі й транзитних. Хоча для транзитного вагонопотоку без переробки, враховуючи незначний час простою на станції й невелику кількість відчеплених і причеплених вагонів, параметри вхідного й вихідного потоків є практично однаковими [12]. Але від якості управління залежить величина затримки між цими потоками, що пов'язана з інтенсивністю потоку обслуговування й безпосередньо впливає на величину технологічних витрат. Крім того, для сталого й надійного функціонування сортувальної станції необхідно забезпечити резерв переробної спроможності, який повинен складати 15–30 % [3], і на який позитивно впливає не лише зменшення простою вагонів під накопиченням, але й зменшення простоїв поїздів у приймальному парку й парку відправлення.

Перепростої составів у парку відправлення в очікуванні призначеної для них нитки графіка призводять також до додаткових витрат, що пов'язані із причепленням локомотивів. Навіть якщо час подачі локомотива є добре спланованим, і подачу здійснюють перед самим відпра-

вленням поїзда з урахуванням часу на опробування гальм локомотивною бригадою, локомотив може прибути на станцію набагато раніше, тому необхідно враховувати весь час його перебування на станції. Другий доданок представляє локомотиво-години простою, що відповідають загальному часу перебування локомотивів на станції. Це доданок із чотирьох елементів, які містяться в круглих дужках. Перші два елементи зі знаком плюс, вони відповідають за збільшення кількості локомотивів за рахунок тих, які були направлені на станцію в порядку виконання регулювальних заходів і тих, що прибувають до станції у складі поїздів. Третій і четвертий елементи зі знаком мінус, вони відповідають за зменшення кількості локомотивів за рахунок відправлених на інші станції за потреби виконання регулювальних заходів, а також тих, що залишають станцію у складі відправлених поїздів.

У ході реалізації певних варіантів плану оперативної роботи СС можливим є виникнення таких ситуацій, коли в момент підходу поїзда не буде вільних колій у приймальному парку. Випадки затримки поїздів на підходах до сортувальних станцій і біля вхідних сигналів можуть спричинити серйозні наслідки – затримку доставки вантажів. Порушення термінів доставки у свою чергу може стати підставою для стягнення із залізниці штрафних виплат на користь вантажовласника. Тому третій доданок, який представляє витрати на простій поїзда перед закритим сигналом вхідного світлофора, призначений для запобігання виникнення таких ситуацій.

До кожної сортувальної станції, розташованої поблизу великих міст, примикає декілька десятків під'їзних колій. Місцева робота становить значну частку від загального обсягу добової роботи СС. Основна частка витрат під час організації місцевої роботи на СС припадає на маневрові операції подавання-забирання вагонів на вантажні fronti підприємств. Ці операції потребують великих обсягів маневрових локомотиво-годин, що обумовлено не лише кількістю під'їзних колій, але й значними відстанями між підприємствами й сортувальними станціями. Відповідно четвертий і п'ятий доданки відображають витрати маневрових локомотиво-годин на виконання операцій подавання й забирання вагонів на вантажні fronti підприємств. За основу визначення часу виконання

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

цих операцій взята формула Фролова, яка призначена для розрахунків нормативного часу напіврейсів під час здійснення маневрових переміщень груп вагонів.

Крім того, на керівні змінні, які входять до складу цільових функцій моделі, накладаються певні обмеження, обумовлені технологічними особливостями процесу обробки поїздів. У ході комплексного огляду поїзда, що перебуває у парку відправлення, працівник вагонної служби, який входить до складу комплексної бригади, разом із членами локомотивної бригади здійснює повне опробування пневматичних гальм. За результатами цієї операції видають довідку за формою ВУ-45. Простій такого поїзда в очікуванні нитки графіка після здійснення цієї операції не повинен перевищувати 30 хвилин. Цій умові відповідає наступне обмеження:

$$t_{ix}^{nktOB} + \tau_{ix}^{nktOB} \leq t_{ix}^B - 30, \quad i = 1..N_B,$$

де  $t_{ix}^{nktOB}$  – час початку виконання комплексного огляду  $i$ -го поїзда в парку відправлення;  $\tau_{ix}^{nktOB}$  – тривалість огляду  $i$ -го поїзда.

План повинен бути коректним із точки зору збереження балансу локомотивів. Швидкість відправлення поїздів не повинна перевищувати швидкість прибуття локомотивів на станцію. Тобто для кожного моменту часу повинно виконуватись обмеження: кількість локомотивів, яка дорівнює кількості поїздів даного напрямку, що пройшли техогляд й очікують на відправлення, не повинна перевищувати кількості всіх наявних локомотивів для обслуговування цього напрямку. Цю наявну кількість можна обчислити як суму локомотивів, що прибули з поїздами даного напрямку до поточного моменту часу, і локомотивів, що прибули в порядку регулювальних заходів для обслуговування цього напрямку до поточного моменту часу, віднявши від неї кількість локомотивів, які на поточний момент часу були відправлені зі станції у складі поїздів цього напрямку. Це обмеження має наступний вигляд:

$$n_t^{kOB} \leq \sum_{i=1}^{N_{II}^k} H(t - t_{ix}^{II}) + \sum_{i=1}^{N_{III}^k} H(t - t_i^{III}) - \sum_{i=1}^{N_B^k} H(t - t_{ix}^B), \quad \forall k, t,$$

де  $n_t^{kOB}$  – кількість локомотивів у складі поїздів  $k$ -го напрямку, які очікують нитки графіка в парку відправлення на момент часу  $t$ ;  $N_{II}^k$  – множина поїздів, що прибувають на станцію з  $k$ -го напрямку;  $N_{III}^k$  – множина локомотивів, що прибувають на станцію в порядку виконання регулювальних заходів для обслуговування поїздів  $k$ -го напрямку;  $N_B^k$  – множина поїздів, що прибувають на станцію з  $k$ -го напрямку;  $t$  – поточний момент часу.

Оперативний план роботи СС повинен також дозволяти реалізувати таку послідовність і терміни виконання операцій, які забезпечать найшвидше відправлення вагонів, що містять вантажі з терміном доставки, який спливає; або вагонів із НВ. Ця вимога може бути виражена у вигляді наступного обмеження:

$$t_{wjx}^B - t_{wix}^{II} \leq \tau_{max}^{cn},$$

$$w = 1..P, \quad j = 1..n_B, \quad i = 1..n_{II},$$

де  $t_{wjx}^B$  – момент часу відправлення  $w$ -го вагона, що належить до множини вагонів із терміном доставки, який спливає; або з НВ, у складі  $j$ -го поїзда зі станції;  $t_{wix}^{II}$  – момент часу прибуття  $w$ -го вагона, що належить до множини вагонів із терміном доставки, який спливає, у складі  $i$ -го поїзда до сортувальної станції;  $\tau_{max}^{cn}$  – нормативний максимальний час перебування вагонів із терміном доставки, який спливає, або з НВ на даній сортувальній станції;  $P$  – потужність множини вагонів із терміном доставки, який спливає, або з НВ, що прибувають до сортувальної станції;  $n_B$  – потужність множини поїздів, які відправляють зі станції;  $n_{II}$  – потужність множини поїздів, що прибувають до станції.

Під час здійснення подач вагонів на вантажні fronti підприємств, що з'єднані з сортувальною станцією під'їзними коліями, кількість вагонів у подачі визначається економічною доцільністю і може варіюватись, але вона не повинна перевищувати довжину вантажних фронтів:

$$m_{ij}^{nod} \leq l_j^{B\Phi}, \quad \forall i, j, \quad i = 1..k_j^{nod}, \quad j = 1..n^{B\Phi},$$

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

де  $m_{ij}^{nod}$  – кількість вагонів у  $i$ -му подаванні до  $j$ -го вантажного фронту;  $l_j^{B\Phi}$  – довжина  $j$ -го вантажного фронту у вагонах;  $k_j^{nod}$  – кількість подавань до  $j$ -го вантажного фронту протягом планового періоду;  $n^{B\Phi}$  – кількість вантажних фронтів.

Оперативний план роботи СС повинен містити такий порядок здійснення операцій із прибуття, формування й відправлення поїздів, який забезпечить наявність вільного місця на коліях накопичення на момент початку кожного розформування. Тобто сумарна місткість колій, які виділені під накопичення составів будь якого напрямку, не повинна бути меншою ніж кількість вагонів, які на ній уже знаходяться, та кількості вагонів цього напрямку, які знаходяться в поїзді, на момент початку його розформування, що можна сформулювати у вигляді наступного обмеження:

$$m_{ij} + \sum_{k=1}^{q_j} m_k^{\tau_i} \leq \sum_{k=1}^{q_j} l_{kj},$$

$$\forall i, j, \quad i=1..N^{\Pi}, \quad j=1..n^{H\Phi},$$

де  $m_{ij}$  – кількість вагонів  $j$ -го напрямку в  $i$ -му поїзді, що надійшов у розформування;  $q_j$  – кількість колій у сортувальному парку, які виділені для накопичення вагонів  $j$ -го напрямку;  $m_k^{\tau_i}$  – кількість вагонів  $j$ -го напрямку, що знаходяться на виділених коліях сортувального парку на момент початку розформування  $i$ -го поїзда;  $\tau_i$  – момент початку розформування  $i$ -го поїзда;  $l_{kj}$  – довжина  $k$ -ої колії, що виділена для накопичення вагонів  $j$ -го напрямку;  $n^{H\Phi}$  – кількість напрямків, на які здійснюють формування составів.

Це обмеження є необхідним для забезпечення утримання вектора керівних змінних у межах області, що відповідає множині варіантів плану, реалізація яких є можливою на практиці. Виникнення ситуацій із переповненням колій сортувального парку пов'язане не лише з помилковими діями оперативного персоналу станцій. Такі ситуації можуть бути наслідком різких коливань вагонопотоків унаслідок збу-

рень, що пов'язані з перервами руху поїздів на дільницях в періоди дії технологічних «вікон» [2].

Обов'язковим також є виконання вимог, що їх висувають до складу сформованих поїздів Правила перевезень небезпечних вантажів. Наступне обмеження запобігає одночасній постановці до складу поїзда вагонів із вибуховими матеріалами та вагонів із вантажами, що належать до будь-якої із зазначених груп: небезпечні вантажі I класу, сильнодіючі отруйні речовини, скраплені, стиснуті або розчинені під тиском газу чи пристрої, що їх містять:

$$H \left( \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{ij}^{BM} \right) + H \left( \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{ij}^{K1} + \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{ij}^{CO} + \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{ij}^{CT} \right) \leq 1,$$

$$\forall i, i \in N_B,$$

де  $n_i$  – кількість вагонів  $i$ -го поїзда;  $\omega_{ij}^{BM}$  – ознака  $j$ -го вагона у складі  $i$ -го поїзда, яка приймає значення 1, якщо вантаж вагона становлять вибухові матеріали, або 0 в іншому випадку;  $\omega_{ij}^{K1}$  – ознака  $j$ -го вагона у складі  $i$ -го поїзда, яка приймає значення 1, якщо у вагоні перевозять небезпечні вантажі I класу, в іншому випадку приймає значення 0;  $\omega_{ij}^{CO}$  – ознака  $j$ -го вагона у складі  $i$ -го поїзда, яка приймає значення 1, якщо у вагоні перевозять небезпечні вантажі у вигляді сильнодіючих отруйних речовин, в іншому випадку приймає значення 0;  $\omega_{ij}^{CT}$  – ознака  $j$ -го вагона у складі  $i$ -го поїзда, який приймає значення 1, якщо у вагоні перевозять небезпечні вантажі у вигляді скраплених, стиснутих або розчинених під тиском газів і пристроїв, що їх містять, в іншому випадку приймає значення 0.

З огляду на те, що побудова раціонального оперативного плану роботи СС є складною комбінаторною задачею й цільові функції моделі не є гладкими, як механізм оптимізації запропоновано використання генетичних алгоритмів. Із метою формування процедури оптимізації доцільно використати спеціалізовані генетичні алгоритми, які розроблені спеціально для

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

відшукування векторів множини Парето. До таких спеціалізованих алгоритмів, які демонструють найкращі результати, у першу чергу можна віднести генетичний алгоритм невідомованого ранжування з використанням механізму елітизму NSGA-II (англ. Fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm) [10]. Для звуження множини Парето й визначення єдиного оптимального компромісного рішення було використано метод граничної корисності [8].

### Результати

Сформована математична модель та запропонований метод її оптимізації становлять основу технології інтелектуального планування для побудови оперативного плану роботи СС. На її основі було створено програмний продукт мовою Matlab, із використанням якого було проведено моделювання. На рис. 1 наведений фронт парето-оптимальних рішень, із яких за допомогою методу граничної корисності було виділене єдине компромісне рішення.

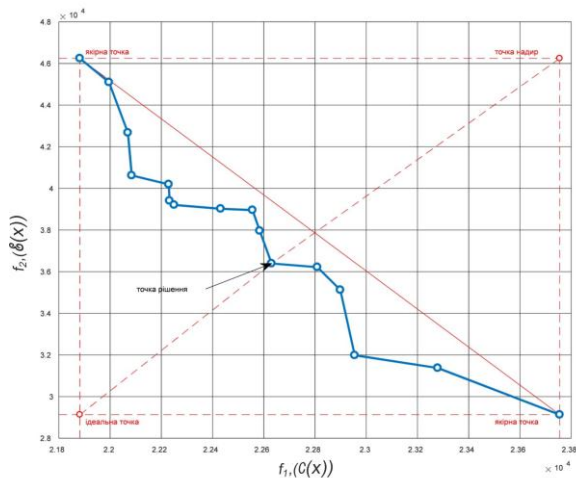


Рис. 1. Точка компромісного рішення, точки невідомованих рішень парето-фронту, ідеальна точка, точка надир та якірні точки

Fig. 1. The point of a compromise solution, the point of non-dominant decisions of the Pareto-front, the ideal point, nadir point and the anchor points

На рис. 2 наведений графічний вигляд оперативного плану роботи СС, який відповідає знайденому оптимальному вектору і який був побудований за допомогою створеного програмного продукту.

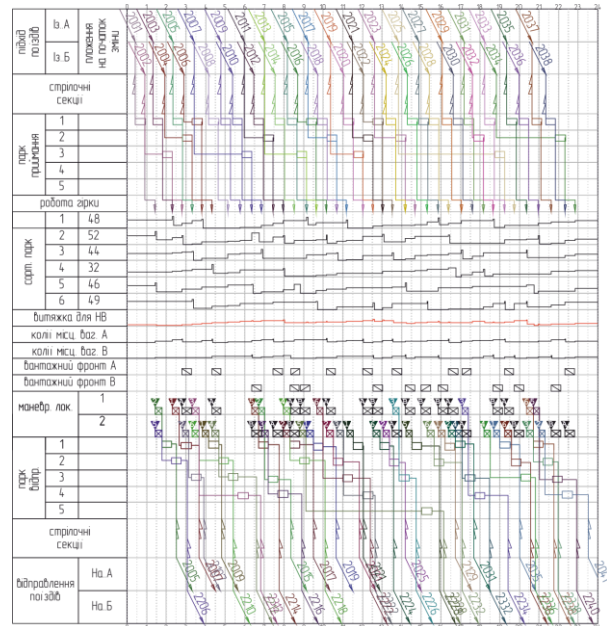


Рис. 2. План-графік оперативної роботи СС на 24-годинний період, отриманий в результаті оптимізації моделі

Fig. 2. Plan-chart of SS operational work for a 24-hour period, obtained as a result of the model optimization

За допомогою створеного програмного забезпечення був побудований також оперативний план на основі традиційної технології планування. Моделювання довело, що використання запропонованої оптимізаційної моделі дозволяє знизити експлуатаційні витрати на величину близько 6,5 % і величини експозиції ризику на 8 %.

### Наукова новизна та практична значимість

У запропонованій технології інтелектуального планування вперше були застосовані принципи багатоцільової оптимізації під час управління оперативною роботою сортувальних станцій в умовах обробки вагонопотоків із небезпечними вантажами. У рамках цієї технології були інтегровані методи пошуку множини парето-оптимальних рішень, її звуження для визначення єдиного компромісного рішення й представлення цього рішення у вигляді плану-графіка роботи, який є зручним для оперативних керівників сортувальних станцій. Використання ефективного механізму оптимізації у вигляді багатоцільового генетичного алгоритму



## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

дозволяє одночасно оптимізувати всі станційні процеси, що у свою чергу дає можливість зменшити експлуатаційні витрати й підвищити рівень безпеки, пов'язаної з обробкою вагонів із небезпечними вантажами.

**Висновки**

Запропонована технологія інтелектуального планування, яка використовує методи моделювання на основі Баєсових мереж, методи багатозацільової оптимізації на основі генетичних алгоритмів, метод граничної корисності для звуження множини Парето й інші, дозволяють комплексно вирішувати задачу оперативного планування роботи сортувальної станції в умовах обробки вагонопотоків із НВ. Ця технологія

на основі компромісного рішення дає можливість не лише знизити експлуатаційні витрати, пов'язані з технологічними процесами СС і вантажних залізничних перевезень, але й дозволяє зменшити величину експозиції, яка є інтегральним показником ризику, тобто кількісним параметром, який описує можливість виникнення аварій і настання негативних наслідків, пов'язаних з обробкою вагонів із НВ. Проведене моделювання довело доцільність упровадження інтелектуальної технології оперативного планування роботи СС із метою зниження експлуатаційних витрат і підвищення рівня безпеки протікання технологічних процесів на СС в умовах обробки вагонопотоків із НВ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бутько, Т. В. Формалізація технології переробки вагонопотоків із небезпечними вантажами на сортувальній станції на основі експозиції ризику / Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2018. – № 2. – С. 18–22.
2. Музикін, М. І. Вплив «вікон» на пропускну спроможність залізничного напрямку / М. І. Музикін, Г. І. Нестеренко // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 3 (51). – С. 24–33. doi: 10.15802/stp2014/25797
3. Музикіна, С. І. Дослідження пропускну спроможності сортувальної станції / С. І. Музикіна, М. І. Музикін, Г. І. Нестеренко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 2 (62). – С. 47–60. doi: 10.15802/stp2016/67289
4. Чехунов, Д. М. Формування моделі оцінки ризиків на сортувальній станції при оперуванні вагонами з небезпечними вантажами із використанням математичних апаратів нечіткої логіки та Байєсових мереж / Д. М. Чехунов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2018. – № 1. – С. 35–41.
5. Course Match: A Large-Scale Implementation of Approximate Competitive Equilibrium from Equal Incomes for Combinatorial Allocation / Eric B. Budish, Gerard Cachon, Judd B. Kessler, Abraham Othman // Operations research. – 2017. – Vol. 65. – Iss. 2. – P. 314–336. doi: 10.1287/opre.2016.1544
6. Khishtandar, S. Comparisons of some improving strategies on NSGA-II for multi-objective inventory system / S. Khishtandar, M. Zandieh // Journal of Industrial and Production Engineering. – 2017. – Vol. 34. – Iss. 1. – P. 61–69. doi: 10.1080/21681015.2016.1210681
7. Lin, E. YardSim: A rail yard simulation framework and its implementation in a major railroad in the U.S. / E. Lin, C. Cheng // Proc. of the Winter Simulation Conference (WSC). – Austin, TX, USA, 2009. – P. 2532–2541. doi: 10.1109/wsc.2009.5429654
8. Multistage methods for freight train classification / R. Jacob, P. Márton, J. Maue, M. Nunkesser // Networks. – 2010. – Vol. 57. – Iss. 1. – P. 87–105. doi: 10.1002/net.20385
9. Optimal freight train classification using column generation / M. Bohlin, H. W. Dahms, M. H. Flier, S. Gestrelus // Proc. of the 12th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems. – Ljubljana, 2012. – P. 10–22.
10. Rail-road trans-shipment yards: layouts and rail operation [Електронний ресурс] / I. Belošević, M. Ivić, M. Kosijer, N. Pavlović, S. Aćimović // Horizons Series B. – 2016. – Vol. 3. – P. 559–569. – Режим доступу: <https://goo.gl/jLUPw3> – Назва з екрана. – Перевірено : 16.10.2018.
11. Track Allocation in Freight-Train Classification with Mixed Tracks / M. Bohlin, H. Flier, J. Maue, M. Mihalák // Proc. of the 11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems. – Saarbrücken, 2011. – P. 38–51.
12. Study of car traffic flow structure on arrival and departure at the marshalling yard X / G. I. Nesterenko, M. I. Muzykin, V. L. Horobets, S. I. Muzykina // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 85–99. doi: 10.15802/stp2016/60986

Т. В. БУТЬКО<sup>1\*</sup>, В. Н. ПРОХОРОВ<sup>2\*</sup>, Д. Н. ЧЕХУНОВ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление эксплуатационной работой», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 89, эл. почта butko@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-1082-599X

<sup>2\*</sup>Каф. «Управление эксплуатационной работой», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 88, эл. почта vicmmx@gmail.com, ORCID 0000-0001-8963-6467

<sup>3\*</sup>Каф. «Управление эксплуатационной работой», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 88, эл. почта cdm2017@meta.ua, ORCID 0000-0002-1570-6351

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СОРТИРОВОЧНЫМИ СТАНЦИЯМИ ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ НА ОСНОВЕ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

**Цель.** В научной работе предполагается формализовать процесс построения плана оперативной работы сортировочной станции в условиях обработки вагонопотоков с опасными грузами. Разработанную математическую модель необходимо реализовать в виде системы интеллектуального планирования, которая позволит минимизировать как эксплуатационные затраты, так и технологические риски в процессе работы сортировочной станции. **Методика.** Проведен анализ современных подходов в моделировании процессов управления транспортными системами в условиях риска. Сформирована математическая модель, которая в своем составе содержит целевую функцию технологических расходов, связанных со всеми основными технологическими операциями, которые выполняются на сортировочной станции: прием, расформирование, формирование и отправление поездов, накопления вагонов, обработка поездов, содержащих вагоны с опасными грузами, операции с местными вагонами. Кроме того, модель также содержит целевую функцию экспозиции риска, которая также требует минимизации с целью максимального уменьшения рисков возникновения аварий и их последствий при оперировании вагонами с опасными грузами. Для оптимизации модели необходимы определенные условия, которые соответствуют технологическим особенностям работы сортировочной станции и которые были формализованы в виде системы ограничений. Оптимизацию модели предложено осуществлять с использованием методов многоцелевой оптимизации на основе генетического алгоритма специального типа. **Результаты.** Сформирована математическая модель, которая позволяет в автоматизированном режиме создать оперативный план работы сортировочной станции с одновременным учетом двух критериев: эксплуатационные расходы и экспозиция риска. Модель была реализована в составе созданного программного продукта, с использованием которого было проведено моделирование. **Научная новизна.** Разработана технология интеллектуального планирования, которая использует методы многоцелевой оптимизации и позволяет находить компромиссное решение, одновременно учитывая как эксплуатационные расходы, так и экспозиции риска в условиях обработки вагонопотоков с опасными грузами. **Практическая значимость.** В ходе моделирования было выявлено, что эффективность предложенной технологии интеллектуального планирования на основе разработанной модели по сравнению с традиционной технологией планирования составляет около 6,5 % по критерию эксплуатационных расходов и около 8 % по критерию экспозиции риска.

*Ключевые слова:* интеллектуальное управление сортировочными станциями; многоцелевая оптимизация; обработка вагонопотоков с опасными грузами

T. V. BUTKO<sup>1\*</sup>, V. M. PROKHOROV<sup>2\*</sup>, D. M. CHEKHUNOV<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Operational Work Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 89, e-mail butko@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-1082-599X

<sup>2\*</sup>Dep. «Operational Work Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 88, e-mail vicmmx@gmail.com, ORCID 0000-0001-8963-6467

<sup>3\*</sup>Dep. «Operational Work Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 88, e-mail cdm2017@meta.ua, ORCID 0000-0002-1570-6351

## INTELLIGENT CONTROL OF MARSHALLING YARDS AT TRANSPORTATION OF DANGEROUS GOODS BASED ON MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION

**Purpose.** The scientific paper involves formalizing the process of building a plan for the operational work of the marshalling yard in the conditions of processing carloads with dangerous goods. The developed mathematical model is implemented in the form of an intelligent planning system that will minimize both operational costs and technological risks during the work of the marshalling yard. **Methodology.** Based on the analysis of modern approaches to the management of transport systems under risk conditions, a mathematical model has been formed that includes the objective function of technological costs associated with all the main technological operations that are performed at the marshalling yard: reception, disbanding, form and departure of trains, accumulation of cars, processing of trains containing cars with dangerous goods, operations with local cars. In addition, the model also contains an objective function of the risk exposure, which also requires minimization in order to minimize the risk of accidents and their consequences when operating cars with dangerous goods. The model should be optimized under certain conditions that correspond to the technological features of the marshalling yard and which were formalized as a system of constraints. Optimization of the model is proposed to be carried out using methods of multiobjective optimization based on a genetic algorithm of a special type. **Findings.** A mathematical model is created that allows in an automated mode to build an operational plan for a marshalling yard operation with simultaneous consideration of two criteria: operational costs and risk exposure. The model was implemented as part of the created software product with the use of which the simulation was carried out. **Originality.** An intelligent planning technology has been developed that uses multiobjective optimization methods and allows finding a compromise solution while taking into account both the criterion of operational expenses and the risk exposure one in the conditions of handling carloads with dangerous goods. **Practical value.** During the simulation it was revealed that the effectiveness of the proposed technology of intelligent planning based on the developed model in comparison with the traditional planning technology is about 6.5% by the criterion of operating costs and about 8% by the criterion of the risk exposure.

**Keywords:** marshalling yards intelligent control; multiobjective optimization; processing of cars flows with dangerous goods

### REFERENCES

1. Butko, T. V., Prokhorov, V. M., & Chekhunov, D. M. (2018). Formalizatsiia tekhnologii pererobky vahonopotokiv iz nebezpechnymy vantazhamy na sortuvalnii stantsii na osnovi ekspozytsii ryzyku *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (2), 18-22. (in Ukrainian)
2. Muzykin, M. I., & Nesterenko, G. I. (2014). Influence of maintenance windows on the working capacity of railway route. *Science and Transport Progress*, 3(51), 24-33. doi: 10.15802/stp2014/25797 (in Ukrainian)
3. Muzykina, S. I., Muzykin, M. I., & Nesterenko, G. I. (2016). Study of working capacity of the marshalling yard. *Science and Transport Progress*, 2(62), 47-60. doi: 10.15802/stp2016/67289 (in Ukrainian)
4. Chekhunov, D. M. (2018). Formuvannia modeli otsinky ryzykiv na sortuvalnii stantsii pry operuvanni vahonamy z nebezpechnymy vantazhamy iz vykorystanniam matematychnykh aparativ nechitkoi lohiky ta Baiiesovykh merezh. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (1), 35-41. (in Ukrainian)
5. Budish, E. B., Cachon, G., Kessler, J. B., & Othman, A. (2017). Course Match: A Large-Scale Implementation of Approximate Competitive Equilibrium from Equal Incomes for Combinatorial Allocation. *Operations Research*, 65(2), 314-336. doi: 10.1287/opre.2016.1544 (in English)
6. Khishtandar, S., & Zandieh, M. (2017). Comparisons of some improving strategies on NSGA-II for multi-objective inventory system. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 34(1), 61-69. doi: 10.1080/21681015.2016.1210681 (in English)
7. Lin, E., & Cheng, C. (2009). YardSim: A rail yard simulation framework and its implementation in a major railroad in the U.S. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 2532-2541). Austin. doi: 10.1109/wsc.2009.5429654 (in English)
8. Jacob, R., Márton, P., Maue, J., & Nunkesser, M. (2010). Multistage methods for freight train classification. *Networks*, 57(1), 87-105. doi: 10.1002/net.20385 (in English)
9. Bohlin, M., Dahms, H. W., Flier, M. H., & Gestrelus, S. (2012). Optimal freight train classification using column generation. *Proc. of the 12th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems* (pp. 10-22). Ljubljana. (in English)

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

---

10. Belošević, I., Ivić, M., Kosijer, M., Pavlović, N., & Aćimović, S. (2016). Railroad transshipment yards: layouts and rail operation. *Horizons Series B*, 3, 559-569. Retrived from <https://goo.gl/jLUPw3> (in English)
11. Bohlin, M., Flier, H., Maue, J., & Mihalák, M. (2011). Track allocation in freight-train classification with mixed tracks. *Proc. of the 11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Mo-delling, Optimization, and Systems* (pp. 38-51). Saarbrücken. (in English)
12. Nesterenko, G. I., Muzykin, M. I., Horobets, V. L., & Muzykina, S. I. (2016). Study of car traffic flow structure on arrival and departure at the marshalling yard x. *Science and Transport Progress*, 1(61), 85-99. doi: 10.15802/stp2016/60986 (in English)

Надійшла до редколегії: 21.06.2018

Прийнята до друку: 05.10.2018