

БУТЬКО Т. В., д.т.н., професор,  
ПРОХОРОВ В. М., к.т.н., асистент,  
ЧЕХУНОВ Д. М., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)

## Формалізація технології переробки вагонопотоків із небезпечними вантажами на сортувальній станції на основі експозиції ризику

*Автоматизовані технології оперативного планування роботи сортувальних станцій мають бути спроможними адекватно оцінювати небезпеки при оперуванні вагонопотоками із небезпечними вантажами і враховувати їх при виконанні процедур оперативного планування. Як основу для побудови таких технологій сформовано математичну модель, яка базується на запропонованому критерії експозиції ризику, що є новим підходом у галузі технічного ризик-менеджменту. Дана модель є перспективною для застосування у вигляді основи при створенні технологій управління ризиками на сортувальних станціях, при оперуванні вагонопотоками із небезпечними вантажами.*

**Ключові слова:** сортувальна станція, автоматизована технологія оперативного планування, вагони з небезпечними вантажами, управління ризиками, експозиція ризику.

### Постановка проблеми

Сортувальні станції (СС) є одними з найважливіших елементів системи залізничних вантажних перевезень, тому актуальним є питання розробки сучасної технології управління оперативною роботою СС. Розроблення сучасної технології управління СС є можливим лише за умови здійснення якісного переходу від інформаційних до автоматизованих керуючих систем, які здатні розв'язувати складні математичні задачі у реальному часі для своєчасного формування рішень. Однак слід зазначити, що сортувальна станція є надзвичайно складною системою, яка не лише функціонує в умовах постійної зміни оперативної ситуації, але й оперує об'єктами, що можуть бути джерелом різного роду небезпек, рівень яких, до того ж, може бути дуже високим. До таких об'єктів у першу чергу належать вагони з небезпечними вантажами (НВ).

Але для технології управління сортувальними станціями необхідними умовами є не лише реалізація принципів автоматизації і логістики для економії ресурсів, але й реалізація концепції безпеки.

Таким чином, на першому етапі формування автоматизованої технології управління сортувальними станціями актуальною є задача створення концепції безпеки і побудова відповідної математичної моделі.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У статті [1] досліджуються загальні переваги і недоліки перевезень небезпечних вантажів залізницею, здійснюються спроби класифікації небезпек, зроблено висновок про важливість побудови відповідних структур і процедур для визначення ступеня ризику, але будь-які математичні моделі відсутні. У роботі [2] для оцінювання ризику при транспортуванні НВ залізницею запропоновано окремо визначати такі три фактори, які названі незалежними: небезпеку (англ. dangerousness), яка відповідає за можливість настання небажаної події протягом часового періоду, що розглядається; вразливість (англ. vulnerability), що відповідає за правдоподібність того, що залізнична підсистема буде уражена при настанні такої події, і незахищеність (англ. exposure), що відповідає за масштаби та тяжкість наслідків, що будуть завдані населенню, навколишньому середовищу та економіці. Також вказано, що перші два фактори необхідно визначати залежно від технології перевезення, типу і стану рухомого складу, дальності перевезення і стану залізничної лінії. Але такий підхід значно ускладнить процедуру оцінювання небезпеки. Власне, величину ризику запропоновано визначати як добуток цих трьох факторів. Недоліком такого підходу є відсутність врахування фактора часу при визначенні величини ризику. У [3] запропоновано для оцінки ризиків при транспортуванні НВ залізницею використовувати дані геоінформаційної системи (ГІС). Використання ГІС може бути корисним для визначення відносного розташування вагонів із НВ, визначення погодних та інших умов у зонах розташування вагонів із НВ, видів операцій, що з ними виконуються, але ці дані можна використовувати лише для визначення поточної

величини ризиків безпосередньо для моменту часу, в який здійснюється оцінювання.

### Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Проблема оцінювання ризиків, що пов'язані з перевезеннями НВ залізницею, незважаючи на декілька десятиріч досліджень, перебуває на початковій стадії розроблення. Недоліком створених моделей є неможливість їх застосування з урахуванням часового домену, що є важливим у процесі планування оперативної роботи об'єктів залізничного транспорту, таких як, наприклад, СС, з метою мінімізації ризиків.

### Формулювання цілей

Метою дослідження є вироблення критерію на основі кількісної оцінки ризиків при оперуванні вагонами з НВ. Даний критерій має базуватись на моделі, яка, враховуючи причинно-наслідкові зв'язки між факторами і можливими подіями, надасть можливість здійснювати кількісні оцінки рівня безпеки, а також встановлювати функціональні залежності рівня безпеки у часовому домені. Розроблення такого критерію і відповідної моделі дасть змогу в автоматизованому режимі мінімізувати безпеки ще на етапі оперативного планування роботи СС, на яких виконуються операції з вагонами з НВ.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Здійснення кількісних оцінок небезпек при плануванні технологічних операцій на об'єктах залізничного транспорту, на яких здійснюється обробка вагонів з НВ, у першу чергу потребує визначення ймовірностей подій, які підвищують можливість настання небажаних подій, таких як аварії, а також імовірність самих аварій. Така модель, яка, використовуючи математичні апарати Байєсових мереж та нечіткої логіки, дає змогу комплексно оцінювати ймовірності таких подій, використовуючи всю наявну і прогнозу інформацію, була запропонована у [4].

Наступним кроком у формуванні технології оперативного планування роботи станції при оперуванні вагонами із НВ є визначення критерію поточної кількісної оцінки ступеня небезпек. Для оцінювання ступеня безпеки у будь-який момент часу доцільно застосувати поняття технічного ризику. Ризик у технічній сфері зазвичай визначається як добуток ймовірності настання небажаної події та величини її наслідків. Тоді для нашого випадку можна записати формулу:

$$R = Q \cdot L,$$

де  $R$  – кількісна оцінка ризику;  $Q$  – ймовірність аварії

вагона з НВ;  $L$  – вартісна оцінка наслідків аварії вагона з НВ.

Таким чином, використовуючи запропоновану у [4] модель для визначення ймовірності аварії, маючи оцінку наслідків аварії та використовуючи поняття технічного ризику, можна запропонувати кількісний критерій у вигляді функції ризику від часу, якщо ймовірність аварії є також функцією від часу.

Виходячи з цього, управління ризиками у випадку, коли на СС перебуває лише один вагон із НВ, зводиться до того, щоб якомога мінімізувати загальний час його перебування на станції і особливо той період, коли ймовірність виникнення аварії є максимальною. Якщо таких вагонів декілька, тоді модель має ускладнитися, тому що виникає додаткова ймовірність настання аварії з одним вагоном з причини виникнення аварії з іншим. Однак запропонована у [4] модель призначена для оцінювання ймовірності аварії за кожним вагоном окремо, і якщо поряд із вагоном з небезпечним вантажем є інший вагон з небезпечним вантажем, який може стати причиною аварії цього вагона, тоді ймовірність виникнення аварії за участю першого вагона зростає на величину ймовірності виникнення аварії, спровокованої аварією на сусідньому вагоні. Якщо таких вагонів поряд є декілька, то цей внесок в ймовірність ще більший.

На сьогодні не існує єдиної теорії управління технічними ризиками. Усі системи управління ризиками мають спільну мету – зменшення можливостей виникнення аварій та масштабів їх наслідків, але задачі і технології управління ризиками повністю залежать від специфіки технологічного процесу виробничих об'єктів, на яких вони впроваджуються.

Основна задача автоматизованої системи управління ризиками на СС під час оперування з вагонами, які містять НВ, – це прискорення обробки поїздів, у складі яких вони прибули, прискорення формування поїздів і відправлення цих вагонів зі станції. Чим більше небезпечним є вантаж, тим більше необхідно скорочувати час перебування таких вагонів на станції. Необхідно також уникати одночасного перебування на станції значної кількості таких вагонів або якомога зменшувати тривалість цього часового інтервалу, а також унеможливити їх перебування на станції у безпосередній близькості один до одного, якщо це можливо, для зменшення ймовірності виникнення ланцюгової реакції у разі виникнення аварії з одним із вагонів. З метою опису і формалізації цих станів запропоновано використати термін – експозиція безпеки. Цей термін тільки починає входити в науковий лексикон. Деякі дослідники ризиків у технічних сферах використовують його у наукових статтях, маючи на увазі його певну схожість із поняттям «перебування під ризиком» (англ. risk

exposure), яке існує у сфері фінансів і бізнесу. Але ці два терміни мають значні відмінності, тому що термін «risk exposure» передбачає перебування суб'єкта під ризиком лише у результаті свідомого вибору та прояву активності, спрямованої, наприклад, на отримання додаткового прибутку. Однак небезпека на виробничих об'єктах безпосередньо пов'язана з технологічними процесами й наявна завжди, зазвичай її не можна повністю уникнути, але необхідно зменшувати її вплив. Спільним у цих термінах є те, що вони, крім імовірностей і величин можливих втрат, ураховують також і часовий інтервал дії ризику. Таким чином, експозиція небезпеки – це перебування об'єкта під впливом факторів, що можуть стати причиною аварій. Згідно з цією логікою, для двох часових інтервалів однакової тривалості впливу ризику, але різної величини ризику, експозиція небезпеки буде більшою там, де була більшою величина ризику. Цей процес є аналогічним до механізму отримання дози радіаційного випромінювання.

Таким чином, основна задача управління ризиками при оперуванні з вагонами, що перевозять небезпечні вантажі, полягає у зменшенні експозиції ризику. Цю задачу можна вирішувати на стадії оперативного

планування роботи сортувальної станції шляхом оптимізації порядку виконання операцій з поїздами на станції.

Виходячи з цього, експозиція ризику є основним критерієм управління ризиками, що пов'язані з транспортуванням небезпечних вантажів, при здійсненні оперативного управління технологічним процесом сортувальних станцій. Тобто експозиція ризику є інтегралом за часом зі змінною верхньою межею від узагальненої функції ризику:

$$E = \int_{t_0}^T R_{\Sigma}(t) dt,$$

де  $T$  – горизонт планування (у хвилинах від початку планового періоду);

$t_0$  – час початку планового періоду;

$R_{\Sigma}(t)$  – узагальнена функція ризику від часу.

Тоді цільову функцію моделі управління ризиками можна записати таким чином:

$$E(x, y) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^A \sum_{k=1}^D \left( \xi_{ij} H(t - \tau_{j,1}^x) \cdot \zeta_{ik} H(\tau_{k,4}^y - t) \cdot Q_i(t) \cdot L_i \right) \rightarrow \min,$$

де  $W$  – потужність множини вагонів, що розглядаються протягом планового періоду;

$A$  – потужність множини поїздів, що прибувають на станцію протягом планового періоду;

$D$  – потужність множини поїздів, що відправляються зі станції протягом планового періоду;

$\xi_{ij}$  – функція, що набуває значення 1, якщо  $i$ -й вагон прибув на станцію у складі  $j$ -го поїзда, або значення 0 – в іншому випадку;

$\zeta_{ik}$  – функція, що набуває значення 1, якщо  $i$ -й вагон відправився зі станції у складі  $k$ -го поїзда, або значення 0 – в іншому випадку;

$t$  – поточне значення часу у хвилинах;

$\tau_{j,1}^x$  – час прийняття на станцію  $j$ -го поїзда;

$\tau_{k,4}^y$  – час відправлення зі станції  $k$ -го поїзда;

$Q_i(t)$  – поточне значення функції імовірності виникнення аварії з  $i$ -м вагоном, яке може бути отримане за допомогою моделі на основі Байєсової мережі;

$H$  – функція Гевісайда, яку визначено таким чином:

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

Цільова функція підлягає мінімізації за умови дотримання обмежень. Перше обмеження стосується кількості поїздів, які можуть одночасно перебувати в парку приймання і містять у своєму складі вагони з небезпечними вантажами. Кількість таких поїздів не має перевищувати кількості спеціальних колій або витяжок парку приймання, що передбачені для них. Це обмеження можна записати таким чином:

$$\sum_{j=1}^A H \left( \sum_{i=1}^W H \left( (t - \tau_{j,3}^x) \cdot (\tau_{j,1}^x - t) \cdot L_i \right) \right) \leq n^A, \quad \forall t \in [0, T],$$

де  $n^A$  – кількість спеціальних колій або витяжок парку приймання.

Подібне обмеження необхідно враховувати також і для парку відправлення:

$$\sum_{j=1}^D H \left( \sum_{i=1}^W H \left( (t - \tau_{j,1}^y) \cdot (\tau_{j,4}^y - t) \cdot L_i \right) \right) \leq n^D, \quad \forall t \in [0, T],$$

де  $n^D$  – кількість спеціальних колій або витяжок парку приймання.

Крім того, необхідно забезпечити своєчасне відправлення зі станції літерних поїздів:

$$\tau_{j,4}^y \leq \tau_j^{\text{відпр.сп.}}, \quad \forall j \in Z,$$

де  $\tau_j^{\text{відпр.сп.}}$  – час відправлення за розкладом літерного поїзда;

$Z$  – множина транзитних літерних поїздів.

## Висновки

У сучасних умовах переходу оперативного планування вантажних залізничних перевезень на автоматизовані технології важливим етапом їх розроблення є формування оптимізаційних моделей, що адекватно відтворюють цей процес. При плануванні роботи сортувальних станцій в умовах переробки вагонопотоків із небезпечними вантажами критерії оцінки небезпек є навіть важливішими за критерії оперативних витрат. Складність формування таких критеріїв обумовлена різноманіттям видів небезпек та оцінки їх ймовірностей з урахуванням взаємного впливу. Для оцінки небезпек запропоновано критерій на основі експозиції ризику, що є новим підходом у галузі управління технічними ризиками. Застосування даного критерію дозволить здійснювати кількісні оцінки небезпек з високою точністю а також значно підвищити рівень диференціації варіантів при виконанні процедури оптимізації оперативного плану роботи сортувальної станції. Запропонована оптимізаційна модель, яка використовує даний критерій, відповідає класичному інтегральному принципу управління та є придатною для застосування у вигляді основи при створенні технологій управління ризиками на об'єктах залізничної інфраструктури, таких як сортувальні станції, при оперуванні вагонопотоками із небезпечними вантажами.

## Список використаних джерел

1. Verma, M. Railroad transportation of dangerous goods: A conditional exposure approach to minimize transport risk [Text] / M. Verma // Transportation Research Part C –Emerging Technologies. 2011. – 19(5). – P. 790–802.

2. Safico, S. Risk assessment on railway transportation of hazardous materials [Text] / S. Safico, D. Graziano, N. Blasi // Risk Analysis. 2014. – 36. – P. 97–106.
3. Bubbico, R. Risk analysis for road and rail transport of hazardous materials: a GIS approach [Text] / R. Bubbico, S. Cave, B. Mazzarotta // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2004. – 17(6). – P. 483–488.
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 [Текст] / Д. М. Чехунов // ІКСЗТ. – 2018. – № 1. – С. 35–41.

**Butko T. V., Prokhorov V. M., Chekhunov D. M. Formalization of technology for processing of railcar flows with dangerous goods at railway switchyard stations based on risk exposure.** The volumes of transportation of dangerous cargoes by railways of Ukraine from year to year only increase. At the same time, the high level of competition in the transport market dictates the need to develop and implement automated technologies for managing the transport process on the railways. Automated technologies for the operational work planning of railway switchyard stations, which are of paramount importance in terms of the needs of the railway industry, should be able to adequately assess the dangers involved in the operation of flows of railcars with dangerous goods and to take them into account when executing operational plan construction procedures. As a basis for the construction of such automated technology, a mathematical model based on the proposed risk exposure criterion, which is a new approach in the field of technical risk management, has been formed. The proposed optimization model, that uses this criterion, corresponds to the classical integral management principle and is suitable for use as a basis for the creation of risk management technologies at railway infrastructure sites, such as switchyard stations, for the operation of railcars with dangerous goods.

**Keywords:** railway switchyard station, automated technology of operational planning, railcars with dangerous goods, risk management, risk exposure.

**Бутько Т. В., Прохоров В. Н., Чехунов Д. Н. Формализация технологии обработки вагонопотоков с опасными грузами на сортировочной станции на основе экспозиции риска.** Автоматизированные технологии оперативного планирования работы сортировочных станций должны быть способными адекватно оценивать опасности при оперировании

вагонопотоками с опасными грузами и учитывать их при выполнении процедур оперативного планирования. В качестве основы для построения таких технологий сформировано математическую модель, которая базируется на предложенном критерии экспозиции риска, что является новым подходом в области технического риск-менеджмента. Данная модель является перспективной для применения в виде основы при создании технологий управления рисками на сортировочных станциях, при оперировании вагонопотоками с опасными грузами.

**Ключевые слова:** сортировочная станция, автоматизированная технология оперативного планирования, вагоны с опасными грузами, управление рисками, экспозиция риска.

*Надійшла 30.03.2018 р.*

**Butko Tetiana Vasylivna**, Dr.Sc., professor, chief of department, department of Management of operational work, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: [butko@kart.edu.ua](mailto:butko@kart.edu.ua) ID ORCID 0000-0003-1082-599X

**Prokhorov Victor Mykolaiovych**, Ph.D., department of Management of operational work, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: [prokhorov@kart.edu.ua](mailto:prokhorov@kart.edu.ua) ID ORCID 0000-0001-8963-6467

**Chekhunov Denys Mykolaiovych**, post graduate, department of Management of operational work, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: [uerm@ukr.net](mailto:uerm@ukr.net) ID ORCID 0000-0002-1570-6351

**Бутько Тетяна Василівна**, д.т.н., професор, завідувач кафедри, кафедра управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: [butko@kart.edu.ua](mailto:butko@kart.edu.ua) ID ORCID 0000-0003-1082-599X

**Прохоров Віктор Миколайович**, к.т.н., кафедра управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: [prokhorov@kart.edu.ua](mailto:prokhorov@kart.edu.ua) ID ORCID 0000-0001-8963-6467

**Чехунов Денис Миколайович**, аспірант, кафедра управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: [uerm@ukr.net](mailto:uerm@ukr.net) ID ORCID 0000-0002-1570-6351