

О. Г. Родкевич, к.т.н.

(доцент кафедри «Управління процесами перевезень» Державного економіко-технологічного університету транспорту, м. Київ)

ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ ТЕОРІЇ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ НАСЛІДКІВ ТРАНСПОРТНИХ ПОДІЙ

У статті розглянуто теоретичний підхід щодо розробки математичної моделі ситуацій, коли транспортна подія з небезпечними вантажами вже відбулась і необхідно ліквідувати її наслідки. Наведено розрахунки, що підтверджують успішність проведення аварійно-відновлювальних робіт при зосередженні відбудовних підрозділів за декількома різними варіантами. Описані практичні аспекти застосування математичних моделей процесів залізничних перевезень небезпечних вантажів та ліквідації наслідків транспортних подій.

Ключові слова: небезпечний вантаж, наслідки надзвичайної ситуації, система масового обслуговування, відбудовний підрозділ, залізничний транспорт, ризик, математична модель

В статье рассмотрен теоретический подход к разработке математической модели ситуаций, когда транспортное событие с опасными грузами уже произошло и необходимо ликвидировать его последствия. Приведены расчеты, которые подтверждают успешность проведения аварийно-восстановительных работ при сосредоточении восстановительных подразделений по нескольким разным вариантам. Описаны практические аспекты применения математических моделей процессов железнодорожных перевозок опасных грузов и ликвидации последствий транспортных событий.

Ключевые слова: опасный груз, последствия чрезвычайной ситуации, система массового обслуживания, восстановительное подразделение, железнодорожный транспорт, риск, математическая модель.

Вступ. Залізничним транспортом перевозиться значна кількість вантажів з різними пожежовибухонебезпечними властивостями, які при аваріях негативно впливають на навколишнє середовище. Тому зрозуміло, що на всіх рівнях організації перевезень небезпечних вантажів повинна приділятися належна увага заходам, спрямованим на охорону навколишнього середовища, раціональне використання природних ресурсів, забезпечення безпеки життєдіяльності людини. Реалізація відповідних заходів має забезпечувати рівновагу, сталість і гнучкість природних систем, порушення яких може призвести до важких негативних наслідків і екологічних катастроф.

У разі виникнення надзвичайної ситуації реалізуються такі основні заходи [1].

- організація захисту персоналу;

© Родкевич О. Г., 2014

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

- переміщення оперативної групи, спеціальних сил і засобів у режимі виникнення надзвичайної ситуації;
- організація роботи, що пов'язана з локалізацією або ліквідацією надзвичайної ситуації із залученням відповідних сил і засобів;
- визначення межі території, на якій виникла надзвичайна ситуація;
- організація робіт, спрямованих на забезпечення сталого функціонування об'єктів транспортного комплексу, життєзабезпечення населення, постраждалого внаслідок події (надзвичайної ситуації);
- організація роботи, що пов'язана з виконанням завдань транспортного забезпечення, а також перевезення спеціальних вантажів, сил і засобів, задіяних для локалізації надзвичайної ситуації та її наслідків;
- здійснення постійного контролю за станом відбудовних (відновлювальних) робіт на об'єктах транспортного комплексу, що зазнали впливу від наслідків надзвичайної ситуації, виконання завдання транспортного забезпечення;
- інформування вищих органів управління щодо рівня надзвичайної ситуації та вжитих заходів, пов'язаних з реагуванням на цю ситуацію.

На місці проведення робіт з ліквідації наслідків транспортних подій приймається рішення щодо тактики ведення аварійно-відбудовних робіт, гасіння пожежі, локалізації забруднення, нейтралізації та дегазації небезпечних вантажів і рухомого складу, техніки та місцевості, проведення заходів медичного захисту та забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя, якомога скорішого відкриття руху, максимального збереження рухомого складу тощо, яке оформляється у вигляді оперативного плану відбудовних робіт [1].

При цьому здійснюються постійний моніторинг ситуації на місці скоєння небезпечної ситуації на підставі чого уточнюється оперативний план проведення робіт.

Для керування безпекою функціонування залізничного транспорту необхідні оцінки і прогнози ризику транспортних подій. Нині застосовуються декілька методів прогнозування ризиків, пов'язаних з надзвичайними подіями природного та техногенного характеру.

За призначенням такі методи поділяються на методи прогнозування виникнення надзвичайних подій та методи прогнозування наслідків таких подій [3 – 7].

Розробка математичної моделі. Надійне та швидке прогнозування наслідків надзвичайної ситуації можливе лише на основі математичних моделей, що описують можливі наслідки розвитку ситуації, зокрема фізичних і техногенних процесів, що її супроводжують.

Розглянемо систему «відбудовні підрозділи – аварійний рухомий склад і об'єкти залізничного транспорту» як замкнену стохастичну мережу – сукупність взаємопов'язаних систем масового обслуговування.

Вигляд мережі залежить від визначеної оперативним планом відбудовних робіт черговості ліквідації наслідків аварійної ситуації – зосередження на них відповідних сил і засобів та проведення визначених робіт.

Загальний вигляд такої замкненої стохастичної мережі подано на рис. 1.

Кількість відбудовних підрозділів n , які необхідні для проведення відбудовних робіт на усіх аварійних об'єктах і рухомому складі залізниці визначаються відповідними розрахунками [7].

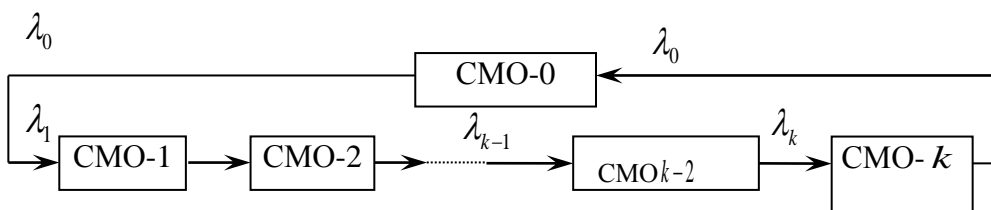


Рис. 1. Замкнена стохастична мережна система «відбудовні підрозділи – аварійний рухомий склад і об’єкти залізничного транспорту» (загальний вигляд)

При цьому

$$n = \sum_{i=1}^k n_i, \quad (1)$$

де k – кількість аварійних об’єктів і рухомого складу;

n_i – кількість відбудовних підрозділів, необхідних для ліквідації наслідків аварій на i -му об’єкті (рухомому складі).

СМО-0 являє собою модель сил і засобів для проведення аварійно-відбудовних робіт, які знаходяться у підпорядкуванні оперативного штабу з ліквідації транспортної події.

Системи масового обслуговування СМО-1, ..., СМО- k моделюють собою аварійні об’єкти і рухомий склад. Зважаючи на те, що кількість відбудовних підрозділів, які прямують до місця транспортної події, обмежена, замкнена мережа завжди має стаціонарний режим [8].

Розрахунок характеристик замкненої стохастичної мережі проводиться у припущенні того, що тривалість обслуговування заявок у системі масового обслуговування, які входять до мережі, є випадковими величинами, які розподілені за експоненційним законом. Важливим обґрунтуванням схеми дослідження даної мережі є й те, що вона може розглядатися як сукупність незалежних систем масового обслуговування з простішими вхідними потоками [8].

Мережа характеризується такими параметрами [9]:

- кількістю $(k + 1)$ систем масового обслуговування, які входять до мережі;
- кількістю обслуговуючих прикладів для кожної системи масового обслуговування (n_0, \dots, n_k) ;

– матрицею перехідних ймовірностей $P = \|P_{ij}\|$, де P_{ij} – ймовірність того, що заявка після проходження i -ї системи масового обслуговування надійде на вхід j -ї СМО;

- кількістю n заявок, які циркулюють у замкненій мережі;
- інтенсивністю λ_j потоку заявок на вході j -ї системи масового обслуговування.

Наведемо послідовність розрахунку числових параметрів стохастичної мережі, що розглядається [9, 10].

1. Визначення матриці перехідних ймовірностей – квадратна, розміром $(k + 1) \times (k + 1)$. Індекс 0 у перехідних ймовірностях належить до джерела заявок СМО-0 (сили і засоби, що підпорядковані оперативному штабу):

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

$$P = \begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots & P_{0k} \\ P_{10} & P_{11} & \dots & P_{1k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{k0} & P_{k1} & \dots & P_{kk} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

При цьому P_{0j} – це ймовірність того, що заявка від СМО-0 надходить на вхід j -ї системи масового обслуговування, а індекс P_{j0} – ймовірність того, що заявка після проходження j -ї системи масового обслуговування прямує до СМО-0. Очевидно, що в матриці P сума елементів кожного з рядків дорівнює 1.

2. Визначення коефіцієнтів передавання $\lambda_j = \frac{x_j}{\lambda_0}$, $j = 1, 2, \dots, n$.

Зважаючи на умову, що у сталому режимі функціонування мережі інтенсивність потоку заявок на вході та виході будь-якої СМО однокова, тобто:

$$\lambda_j = \sum_{i=0}^k P_{ij} x_j, \quad j = \overline{0, k}, \quad (3)$$

Можна записати систему однорідних лінійних рівнянь відносно $\lambda_0, \dots, \lambda_k$, яка буде мати вигляд:

$$\begin{cases} (P_{00} - 1)\lambda_0 + P_{10}\lambda_1 + \dots + P_{k0}\lambda_k = 0 \\ P_{01}\lambda_0 + (P_{11} - 1)\lambda_1 + \dots + P_{k1}\lambda_k = 0 \\ \dots \\ P_{0k}\lambda_0 + P_{1k}\lambda_1 + \dots + (P_{kk} - 1)\lambda_k = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

Для знаходження d_j потрібно розв'язати щодо λ_j систему лінійних рівнянь (4), для чого усі елементи системи (4) поділити на λ_0

$$\begin{cases} (P_{00} - 1) + P_{10}\lambda_1 + \dots + P_{k0}\lambda_k = 0 \\ P_{01} + (P_{11} - 1)\lambda_1 + \dots + P_{k1}\lambda_k = 0 \\ \dots \\ P_{0k} + P_{1k}\lambda_1 + \dots + (P_{kk} - 1)\lambda_k = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

3. Розрахунок ймовірностей станів мережі

Стан мережі визначається кількістю заявок у кожній системі масового обслуговування мережі. Позначимо кількість заявок у j -й СМО, $j = \overline{1, k}$ через n_j .

Сукупність значень $\{n_0, \dots, n_k\}$ визначає стан мережі. З урахуванням (1) параметр, що визначається, має вираз [9, 10].

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

$$j_n \{n_0, \dots, n_k\} = \frac{P_{n_0}^0 \dots P_{n_k}^k}{\sum_{A(n,k)} \prod_{j=0}^k P_{n_j}^{(j)}}, \quad (6)$$

У чисельнику (6) – добуток ймовірностей станів системи масового обслуговування, які входять до мережі, а $P_{n_j}^{(j)}$ – ймовірність стану для кожної j -ї СМО.

У знаменнику (5) сумуються всі стани, якщо $\sum_{i=0}^k n_i = n$ (множина таких станів позначається $A(nk)$).

Знаменник у (6) – це нормуючий множник, який вводиться для того, щоб сума ймовірностей усіх можливих станів мережі дорівнювала 1.

Розглянемо детальніше функціонування СМО замкненої стохастичної мережі.

СМО-0 являє собою n -каналну систему масового обслуговування, граф станів якої наведений на рис. 2.

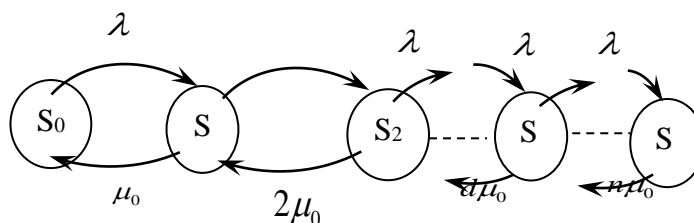


Рис. 2. Граф станів n -каналної СМО-0

Функціонування такої СМО детально розглянутий у [8 – 13].

Фінальні ймовірності станів такої СМО виражаються формулами:

$$P_0 = \left\{ 1 + \frac{\rho}{1!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} \right\}^{-1} \quad P_k = \frac{\rho_k}{k!} P_0, (1 \leq k \leq n) \quad (7)$$

Потік відбудовних підрозділів приймається простішим [8 – 13]:

$$\lambda = \frac{1}{\mu [T_{cp}]}, \quad (8)$$

При цьому інтервал часу між подіями у цьому потоці розподілений за показниковим законом з параметром λ :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, (t \geq 0), \quad (9)$$

Інтервал часу T_g визначається співвідношенням:

$$T_{cp} = \tau_{cn} + \tau_{np}, \quad (10)$$

де τ_{cn} – термін часу сповіщення про надзвичайну ситуацію;

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

τ_{np} – термін часу на оцінювання обстановки на місці транспортної події та прийняття рішення на відправлення відбудовних підрозділів.

Термін часу на збір персоналу відбудовного підрозділу, виконання заходів щодо відправлення відбудовного підрозділу до місця транспортної події визначається відповідним регламентом. Швидкість руху відбудовних підрозділів повинна відповідати встановленій із дотриманням діючих обмежень за станом колії та рухомого складу підрозділу [1].

Тобто, термін часу T_{nn} , необхідний для відправлення і просування відбудовних підрозділів визначається співвідношенням

$$T_{nn} = \tau_{зв} + \tau_n, \quad (11)$$

де $\tau_{зв}$ – термін часу, необхідний для відправлення відбудовного підрозділу;

τ_n – термін часу, необхідний для прибуття відбудовного підрозділу на місце транспортної події.

Інтенсивність відправлення та прямування відбудовного підрозділу з місця постійної дислокації буде:

$$\mu_0 = \frac{1}{M[T_{nn}]}. \quad (12)$$

T_{nn} є випадковою величиною, розподіленою за показниковим законом з параметром μ_0 .

Після прибуття на місце транспортної події, відбудовні підрозділи здійснюють розгортання відбудовної техніки і механізмів перед їх застосуванням за призначенням.

Після розгортання техніки і механізмів персонал відбудовних підрозділів здійснює виконання аварійно-відновлювальних робіт згідно з технологічними картами [1].

Швидкість розгортання та їх застосування за призначенням техніки і механізмів певною мірою залежить від умов та обставин на місці транспортної події, фізичної натренованості персоналу підрозділів, способів і пристроїв розгортання тощо. Якщо застосовувати для ліквідації наслідків транспортної події n відбудовних підрозділів з аварійно-відновлювальною технікою однакової продуктивності, то систему масового обслуговування можна подати як СМО з n_1 каналами обслуговування.

Граф станів такої системи поданий на рис. 3.

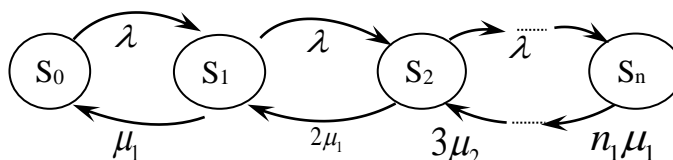


Рис. 3. Граф станів n_1 – каналної системи масового обслуговування

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

Фінальні стани такої системи масового обслуговування аналогічні фінальним станам СМО-0, а саме:

$$P_d = \frac{\rho^d}{d!}, (1 \leq d \leq n_1); \quad P_0 = \left\{ 1 + \frac{\rho}{1!} + \dots + \frac{\rho^{n_1}}{n_1!} \right\}^{-1}. \quad (13)$$

Якщо для ліквідування транспортної події застосовується один агрегат, то система масового обслуговування, яка моделює роботу такого підрозділу являє собою простішу СМО з відмовами, граф станів якої поданий на рис.4.

Фінальні стани такої системи [13]:

$$P_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}; \quad P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad (14)$$

За умови, що для ліквідування наслідків транспортної події використовується техніка з різною продуктивністю, тоді для застосування двох агрегатів, системи масового обслуговування що моделює їх функціонування, має вигляд, зображений на рис. 5.

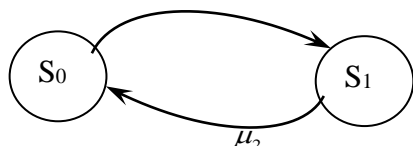


Рис. 4. Граф станів системи масового обслуговування, яка моделює роботу підрозділу

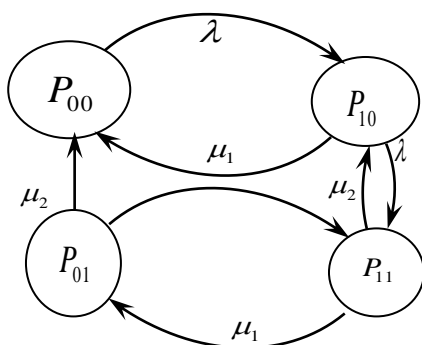


Рис. 5. Граф станів системи масового обслуговування з послідовно розташованими приладами різної продуктивності

Ймовірність станів системи, зображених на рис. 5:

P_{00} – перший і другий прилади вільні від обслуговування;

P_{10} – перший прилад зайнятий обслуговуванням, другий вільний;

P_{01} – перший прилад вільний, другий зайнятий обслуговуванням;

P_{11} – обидва прилади зайняті обслуговуванням.

Система алгебраїчних рівнянь станів системи[10]:

$$\begin{cases} \lambda P_{00} = \mu_1 P_{11} + \mu_2 P_{01} \\ (\lambda + \mu_2) P_{01} = \mu_1 P_{11} \\ (\lambda + \mu_1) P_{10} = \lambda P_{00} + \mu_2 P_{11}, \\ (\mu_1 + \mu_2) P_{11} = \lambda P_{01} + \lambda P_{10} \\ P_{00} + P_{01} + P_{10} + P_{11} = 1 \end{cases} \quad (15)$$

Розв'язання системи (15) дає:

$$\begin{aligned} P_{\text{відм}} = P_{11} &= \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + \lambda(\mu_1 + \mu_2) + \frac{\mu_1 \mu_2}{\lambda + \mu_2} (2\lambda + \mu_1 + \mu_2)}; \\ P_{00} &= \frac{\mu_1 \mu_2 (2\lambda + \mu_1 + \mu_2)}{\lambda^2 (\lambda + \mu_2)} P_{11} \lambda + \mu_2 \\ P_{10} &= \frac{\mu_2 (\lambda + \mu_1 + \mu_2)}{\lambda (\lambda + \mu_2)} P_{11} \lambda + \mu_2 \\ P_{01} &= \frac{\mu_1}{\lambda + \mu_2} P_{11}. \end{aligned} \quad (16)$$

Аналіз функціонування такої системи масового обслуговування, проведений у [13], дає важливий для практики висновок: для того, щоб ефективність обслуговування системи була найбільшою, перший прилад повинен мати вищу продуктивність у порівнянні з другим.

Відобразимо це на прикладі дослідження замкненої стохастичної мережної системи «відбудовні підрозділи – аварійний рухомий склад і об'єкти залізничного транспорту».

Припустимо, що для проведення аварійно-відновлювальних робіт треба 6 підрозділів з технікою однокової продуктивності для кожного підрозділу, тобто $n = 6$. Кількість підрозділів для аварійних об'єктів: $n_1 = 2, n_2 = 1, n_3 = 3$.

При цьому розглянемо для прикладу два варіанти дій:

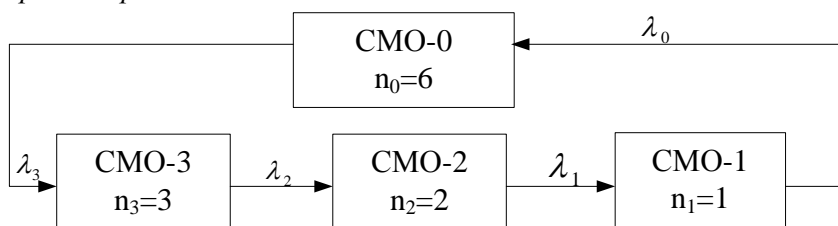
1) На третій аварійний об'єкт (СМО-3) від СМО-0 надходить 3 підрозділи, на другий об'єкт (СМО-2) надходить 2 підрозділи і на перший об'єкт (СМО-1) – один підрозділ;

2) Порядок надходження підрозділів обернений – на перший об'єкт надходить 1 підрозділ, на другий – 2 підрозділи і на третій – 3 підрозділи.

Зрозуміло, що варіантів надходжень відбудовних підрозділів може бути більше, але методика розрахунку параметрів мережі і відповідних висновків, як буде показано нижче, від цього принципово не зміниться.

Варіанти схеми замкненої стохастичної мережі, що розглядається, надані на рис. 6.

Перший варіант



Другий варіант

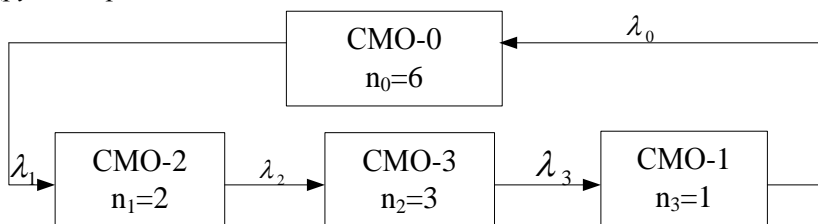


Рис. 6. Варіанти замкненої стохастичної мережної системи

Визначимо матрицю перехідних ймовірностей цієї мережі.

$$P = \begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} & P_{03} \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{20} & P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{30} & P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

Для першого та другого варіанта черговості обслуговування матриця перехідних ймовірностей матиме такий вигляд:

$$\text{Перший варіант } P_1 = \begin{pmatrix} 0001 \\ 1000 \\ 0100 \\ 0010 \end{pmatrix}, \text{ Другий варіант } P_2 = \begin{pmatrix} 0100 \\ 1000 \\ 0010 \\ 0100 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

Знайдемо інтенсивності потоків на вході кожної системи масового обслуговування, для чого складемо систему рівнянь виду (19), яка для випадку, що розглядається, буде мати вигляд:

$$\begin{cases} (P_{00} - 1)\lambda_0 + P_{10}\lambda_1 + P_{20}\lambda_2 + P_{30}\lambda_3 = 0 \\ P_{01}\lambda_0 + (P_{11} - 1)\lambda_1 + P_{21}\lambda_2 + P_{31}\lambda_3 = 0 \\ P_{02}\lambda_0 + P_{12}\lambda_1 + (P_{22} - 1)\lambda_2 + P_{32}\lambda_3 = 0 \\ P_{03}\lambda_0 + P_{13}\lambda_1 + P_{23}\lambda_2 + (P_{33} - 1)\lambda_3 = 0 \end{cases} \quad (19)$$

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

З урахуванням (13) та (14) інтенсивності потоків на входах СМО у першому та другому варіантах будуть визначатися співвідношенням:

$$\lambda = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_0, \quad (20)$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Ймовірності усіх можливих станів СМО, які входять до мережі за першим та другим варіантом

Кількість підрозділів для аварійних об'єктів СМО	<i>СМО – 0</i>	<i>СМО – 3</i>	<i>СМО – 2</i>	<i>СМО – 1</i>
	$n_0 = 6$	$n_3 = 3$	$n_2 = 2$	$n_1 = 1$
Ймовірність надходження заявки	$P_0^{(0)} = 0,15$	$P_0^{(3)} = 0,13$	$P_0^{(2)} = 0,09$	$P_0^{(1)} = 0,15$
	$P_1^{(0)} = 0,26$	$P_1^{(3)} = 0,3$	$P_1^{(2)} = 0,36$	$P_1^{(1)} = 0,85$
	$P_2^{(0)} = 0,23$	$P_2^{(3)} = 0,31$	$P_2^{(2)} = 0,55$	
	$P_3^{(0)} = 0,14$	$P_3^{(3)} = 0,26$		
	$P_4^{(0)} = 0,06$			
	$P_5^{(0)} = 0,02$			
	$P_6^{(0)} = 0,05$			
Інтенсивність відправлення та слідування відбудовного поїзда	$\mu_0 = 0,4$	$\mu_3 = 0,3$	$\mu_2 = 0,2$	$\mu_1 = 0,125$

Ймовірність можливих станів мережі визначається за допомогою формули (6), результати розрахунків наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Ймовірності можливих станів системи

Ймовірності можливих станів системи	Перший варіант	Другий варіант
I_{M1}	0,003	0,002
I_{M2}	0,003	0,002
I_{M3}	0,01	0,006
I_{M4}	0,02	0,06
I_{M5}	0,1	0,15
I_{M6}	0,2	0,2
I_{M7}	0,7	0,6

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

Тобто успішність проведення аварійно-відновлювальних робіт при зосереженні відбудовних підрозділів за першим варіантом більша, ніж при зосереженні таких підрозділів за другим варіантом.

Проте, результати моделювання роботи мережі за першим варіантом свідчать, що потрібно змінити концепцію застосування сил і засобів відбудовних підрозділів, а саме: або збільшити їх кількість, або застосувати техніку різної продуктивності.

Висновки. Для визначення успішності проведення аварійно-відновлювальних робіт відбудовними підрозділами на аварійних об'єктах і в рухомому складі залізничного транспорту, за умови, коли відомі тільки часові характеристики їх діяльності, можливе використання математичного апарату теорії масового обслуговування і, зокрема, математичних моделей на базі замкнених мережних систем.

У роботі застосовані математичні моделі для ймовірнісного оцінювання дій відбудовних підрозділів при проведенні аварійно-відновлювальних робіт на залізничному транспорті. Подальшими напрямками системи, що розглядається, є застосування моделі, яка пропонується, для дослідження мережі, до складу якої входять СМО з різними характеристиками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Родкевич О.Г. Закономірності та використання факторів ефективності системи перевезення небезпечних вантажів. / О.Г. Родкевич // дис. канд. техн. наук: спец. 05.22.01 Транспортні системи [Текст]. – К.: ДЕТУТ, 2013. – 232 с.
2. Акимов В.А. Основы анализа и управления риском в природных и техногенных сферах. / В.А. Акимов, В.В. Лесных, Н.Н. Радаев. – М.: Деловой экспресс, 2004. – 352 с.
3. Горелова В.Л., Мельникова Е.Н. Основы прогнозирования систем. – М.: ВШ, 1986. – 287 с.
4. Степанов Б.М. Теоретические основы обеспечения безопасности жизнедеятельности. – М.: ВА РВСН, 2001. – 351 с.
5. Гусев Ю.В., Миролюбов Ю.Б. Прогнозирование в военном деле. – М.: Воениздат, 1975. – 279 с.
6. Рабочая книга по прогнозированию / Ред.кол.: Н.В. Бестужев-Лада, – М.: 1982. – 430 с.
7. Методичні рекомендації щодо визначення нормативів часу на проведення аварійно-відновлювальних робіт із використанням основних технічних засобів відбудовних поїздів залізниць України [Текст]: наказ Укрзалізниці від 17.12.08 № 548-Ц. – К.: Укрзалізниця, 2009. – 148 с.
8. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями / Под ред. Б.С. Цыбакова. – М.: Мир, 1979. – 432 с.
9. Основы теории вычислительных систем / Майоров С.А. и др.: Под ред. С.А. Майорова. – М.: Высшая школа, 1978. – 408 с.
10. Информационные технологии на железнодорожном транспорте / Под ред. Э.К. Лецкого, Э.С. Поддавашкина, В.В. Яковлева. – М.: УМК МПС России, 2001. – 668 с.
11. Новиков О.А., Петухов С.И. Прикладные вопросы теории массового обслуживания. – М.: Сов. радио, 1969. – 352 с.
12. Лукин А.Н. Системы массового обслуживания: Анализ систем массового обслуживания с отказами в военной практике.: Воениздат, 1980. – 189 с.
13. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Сов. радио, 1972. – 552 с.

Oksana G. Rodkevych, PhD (Technical Sciences)
(Associate Professor, Operation of Transportation Processes Chair, State University for Transport Economy and Technologies)

APPLICATION OF MATHEMATICAL TOOLS OF QUEUING THEORY TO MODEL THE CONSEQUENCES OF TRAFFIC ACCIDENTS

The article focuses on the theoretical approach to the development of mathematical models of situations when traffic accident with dangerous goods have already occurred and it is necessary to eliminate its consequences. The article presents calculations confirming the success of the remediation while focusing recovery units in several different variants. The article highlights practical aspects of mathematical models of dangerous goods transportation processes by rail and elimination the effects of traffic accidents application.

Keywords: dangerous goods, emergency response, queuing system, reconditioning unit, railway transport, risk, mathematical model.

REFERENCES

1. Rodkevych O.H. Zakonomirnosti ta vykorystannia faktoriv efektyvnosti systemy perevezennia nebezpechnykh vantazhiv. / O.H. Rodkevych // Dys. kand. tekhn. nauk: spets. 05.22.01 Transportni systemy [Tekst]. Kyiv: DETUT, 2013. – 232 s.
2. Akymov V.A. Osnovy analiza y upravleniya ryskom v pryrodnykh y tekhnohennnykh sferakh. V.A. Akymov, V.V. Lesnykh, N.N. Radaev. – M.: Delovoi ekspress, 2004. – 352 s.
3. Horelova V.L., Melnykova E.N. Osnovy prohnozyrovanyia system. – M.: VSh, 1986. – 287 s.
4. Stepanov B.M. Teoretycheskye osnovy obespecheniia bezopasnosti zhyznedeiatelnosti. – M.: VA RVSNI, 2001. – 351 s.
5. Husev Iu.V., Myroliubov Iu.B. Prohnozyrovanye v voennom dele. – M.: Voennydat, 1975. – 279 s.
6. Rabochaia knyha po prohnozyrovanyiu / Red.kol.: N.V. Bestuzhev-Lada, – M.: 1982. – 430 s.
7. Metodychni rekomendatsii shchodo vyznachennia normatyviv chasu na provedennia avariino-vidnovliuvalnykh robiv iz vykorystanniam osnovnykh tekhnichnykh zasobiv vidbudovnykh poizdiv zaliznyts Ukrainy [Tekst] : nakaz Ukrzaliznytsi vid 17.12.08 № 548-Ts. – K. : Ukrzaliznytsia, 2009. – 148 s.
8. Kleinrok L. Vychyslytelnye systemy s ocherediamy / Pod red. B.S. Tsybakova. – M.: Myr, 1979. – 432 s.
9. Osnovy teoryi vychyslytelnykh system / Maiorov S.A. y dr.: Pod red. S.A. Maiorova. – M.: Vysshaha shkola, 1978. – 408 s.
10. Ynfornatsyionnye tekhnolohyy na zheleznodorozhnom transporte / Pod red. Э.К. Letskoho, Э.С. Poddavashkina, V.V. Yakovleva. – M.: UMK MPS Rossyy, 2001. – 668 s.
11. Novykov O.A., Petukhov S.Y. Prykladnye voprosy teoryi massovoho obsluzhyvaniia. M.: Sov. radyo, 1969. – 352 s.
12. Lukyn A.N. Systemy massovoho obsluzhyvaniia: Analiz system massovoho obsluzhyvaniia s otkazamy v voennoi praktyke.: Voennydat, 1980. – 189 s.
13. Venttsel E.S. Yssledovanye operatsyi. – M.: Sov. radyo, 1972. – 552 s.