

УДК 656.265

М.Д. Кацман, В.К. Мироненко, В.І. Мацюк

*Державний економіко-технологічний університет транспорту, Київ*

## МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕКОЛОГІЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПОДІЙ

*В статті розглянуті математичні моделі процесів розвитку залізничних транспортних подій з небезпечними вантажами. Запропоновано нові підходи до раціонального розташування ліквідаційних підрозділів на мережі залізниць і визначення ефективності дій таких підрозділів для досягнення мінімального екологічного збитку та втрати вантажів.*

**Ключові слова:** математичні моделі, залізничні транспортні події, небезпечні вантажі, екологічний збиток, ліквідаційні підрозділи.

### Вступ

Дослідження екологічно небезпечних залізничних транспортних подій з небезпечними вантажами свідчать про те, що вони мають складний характер свого розвитку, кінцевим результатом якого є виникнення важких наслідків, пов'язаних з вибухами, пожежами, руйнуванням рухомого складу і об'єктів, ушкодженнями або загибеллю людей, забрудненням навколишнього природного середовища.

Розгляд типових екологічно небезпечних надзвичайних ситуацій показує на можливі сценарії їх розвитку [1, 2]:

– повільне накопичення негативних факторів екологічно небезпечної ситуації, але не до рівня їх критичних значень, що у свою чергу не призводить до вибухів або пожежі;

– повільне накопичення негативних факторів екологічно небезпечної ситуації, вихід їх за межі критичних значень з подальшим вибухом чи пожежею;

– швидке накопичення негативних факторів екологічно небезпечної ситуації з виходом їх за критичні межі та пов'язаних з вибухом або пожежею.

Проведений аналіз необхідних дій щодо локалізації таких наслідків показав, що заходи, які треба провести, мають широкий спектр – від ручної праці до застосування складних механізмів відповідних підрозділів залізниць та інших міністерств і відомств, які беруть участь у проведенні локалізаційних дій.

Тому аналіз обстановки, яка склалася у результаті виникнення залізничної транспортної події з небезпечними вантажами, прийняття своєчасного обґрунтованого рішення керівником оперативної групи з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, які проходять в обстановці дефіциту часу, пов'язаного з необхідністю найскорішого відновлення руху поїздів, збільшенням з плином часу екологічних та інших збитків, є складним процесом, який потребує застосування сучасних інформацій-

них технологій, в тому числі й систем підтримки прийняття рішень (СППР).

Проблемам автоматизації процесів управління локалізацією екологічно небезпечних наслідків надзвичайних ситуацій з небезпечними вантажами присвячена низка робіт, в яких розглядаються різні аспекти процесу автоматизації роботи відповідних органів управління [3, 4].

Важливим аспектом роботи такої оперативної групи є визначення необхідної кількості сил і засобів для проведення комплексу робіт, розроблення плану дій та оцінювання його результативності.

Однією з проблем розроблення плану дій є проблема зосередження аварійних підрозділів з урахуванням місць їх постійної дислокації, рельєфу місцевості, наявності джерел водопостачання, розвитку залізничної та дорожньої інфраструктури, метеорологічних умов, характеру змін параметрів небезпечних факторів надзвичайної ситуації, загальних, пожежо-вибухонебезпечних властивостей небезпечного вантажу тощо. Ця проблема ускладнюється за умови, що надзвичайна ситуація супроводжується пожежею небезпечного вантажу, або процесу локалізації наслідків небезпечної ситуації передує процес локалізації пожежі.

Природно, що на успіх проведення локалізаційних робіт вагомо впливають також рівень професійної підготовки персоналу і справність технічних засобів. Процеси настання залізничних транспортних подій, їх розвиток носять складний ймовірнісний характер. Для визначення взаємозалежностей між характером потоку небезпечних факторів надзвичайної ситуації, яка сталася внаслідок транспортної події з небезпечним вантажем, продуктивністю сил і засобів з урахуванням терміну часу, необхідного для їх зосередження, на наш погляд, доцільно застосовувати методи теорії масового обслуговування, яка є однією з найбільш розвинутих гілок теорії ймовірностей.

## 1. Моделювання дій аварійних підрозділів

Розглянемо об'єкт, на якому здійснюються локалізаційні роботи як систему масового обслуговування «аварійний об'єкт – ліквідаційні підрозділи».

На вхід  $n$ -канальної системи масового обслуговування ( $n$  – кількість локалізаційних підрозділів) надходить простіший потік вимог (небезпечного фактору надзвичайної ситуації) з інтенсивністю  $\lambda$ . Час обслуговування  $T_{пр}$  – показовий з параметром  $\mu$ . Процес обслуговування вимоги має таку особливість, що перед тим як почати обслуговування вимоги, прилад обслуговування повинен підготуватися. Час підготовки приладу  $T_{зос}$  має показовий розподіл з параметром  $\nu$ . Вимога, яка застає прилад обслуговування вільним, надходить на обслуговування. Вимога, яка застає усі прилади обслуговування зайнятими, стає у чергу й чекає обслуговування.

Таким чином, випадкова величина  $T_{лік}$  складається з двох фаз: підготовки та обслуговування:

$$T_{лік} = T_{зос} + T_{пр}. \quad (1)$$

Таким чином, випадкова величина  $T_{зос}$  розподілена за узагальненим законом Ерланга 2-го порядку з параметрами  $\nu$  та  $\mu$ . Закон розподілу щільності імовірності цього закону виражається формулою [5]:

$$g(t) = \int_0^t \nu e^{-\nu t_1} \mu e^{-\mu(t-t_1)} dt_1 = \frac{\nu \mu (e^{-\nu t} - e^{-\mu t})}{\mu - \nu}, (t > 0), \quad (2)$$

де

$$\nu = 1/M[T_{зос}], f_1(t) = \nu e^{-\nu t}; \quad \mu = 1/M[T_{пр}], f_2(t) = \mu e^{-\mu t}.$$

Потік обслуговування у такому СМО не пуассонівський, тобто система не є марківською, й знайти імовірності станів СМО за методикою для марківських процесів з дискретними станами та безперервним часом можливості немає.

Відомо, що порушення пуассонівського розподілу подій у будь-якій СМО переводить її з марківської у немарківську, у результаті чого, як це підкреслювалося вище, безпосереднє виведення й використання рівнянь Колмогорова стає неможливим. Тому для аналізу таких СМО найбільш розповсюджені два напрямки аналітичних методів аналізу немарківських систем [5 – 8]:

– напрямок, який базується на використанні звичайної теорії марківських ланцюгів, але потребує для своєї реалізації розширення фазового простору можливих станів досліджуваної системи (метод псевдостанів) [5 – 8];

– напрямок, який пов'язаний з використанням більш складного математичного апарату, але без штучного збільшення станів системи (метод напівмарківських процесів) [6, 7, 8].

Обидва ці напрямки мають між собою багато спільного, але розрізняються за своїми можливостями і ступенем складності для проведення розрахунків.

Використання напівмарківського процесу передбачає розглядання поведінки системи тільки у моменти зміни її станів (у моменти стрибків процесу), у результаті чого утворюється ланцюг Маркова. У цьому випадку відсутність післядії реалізується не будь-якої миті часу, як це має місце у марківському процесі, а лише у мить стрибків. Ефективність застосування цього методу залежить від способів задавання напівмарківського процесу. У будь-якому випадку повинна бути відомою скінчена множина можливих станів системи, що досліджується, пов'язаних у марківський ланцюг, а також напрямки можливих переходів системи з одного стану у інший та її вихідний стан.

Метод псевдостанів використовується тільки при наявності вхідного потоку вимог і потоку обслуговування з пуассонівською функцією розподілу щільності ймовірностей, які є композицією експоненційних розподілів з однаковим параметром. Він дозволяє достатньо просто, з математичної точки зору, використовуючи звичайний запис рівнянь Колмогорова, аналізувати немарківську СМО як у сталому, так й у несталому режимах функціонування. Але цей метод значно ускладнює структуру вихідного графа станів, що призводить до громіздкості обчислювального процесу [5, 6].

Штучне розширення фазового простору станів немарківської (ерлангівської) системи за рахунок введення в неї додаткових (фіктивних) станів, що переводить її у марківську, дозволяє розглядати вихідний немарківський процес як би вкладеним у інший, більш складний, але з марківськими властивостями, процес [5, 6].

Розглянемо функціонування СМО, як об'єкт, на якому здійснюються локалізаційні роботи за умови, що є обмеження по довжині черги й небезпечні фактори екологічно небезпечної надзвичайної ситуації негативно впливають на реципієнти, які знаходяться у незмінних межах небезпечних зон таких факторів. Граф станів такої СМО поданий на рис. 1.

Стани СМО:

$S_0$  – СМО вільна;

$S_{11}$  – у СМО одна вимога, обслуговування у першій фазі;

$S_{12}$  – у СМО одна вимога, обслуговування у другій фазі;

.....  
 $S_{m1}$  – у СМО  $m$  вимог, обслуговування у першій фазі, черги немає;

.....  
 $S_{(m+\chi)1}$  – у СМО  $(m+\chi)$  вимог ( $m$  вимог обслуговуються,  $\chi$  знаходяться у черзі), обслуговування у першій фазі;

$S_{(m+\chi)2}$  у СМО  $(m+\chi)$  вимог ( $m$  вимог обслуговуються,  $\chi$  знаходяться у черзі), обслуговування у другій фазі.

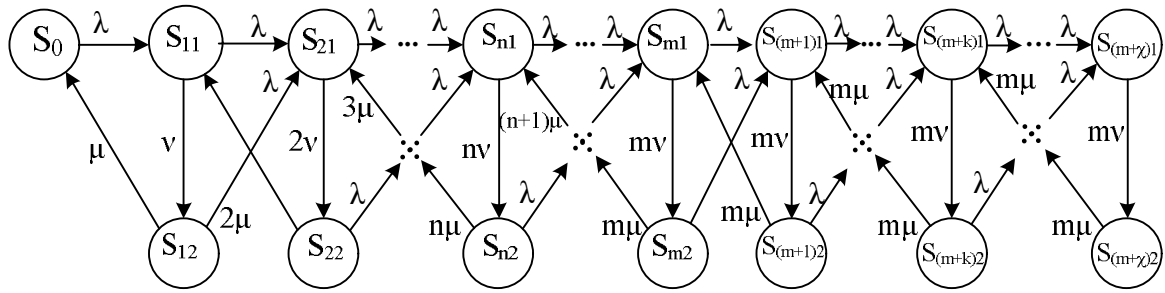


Рис. 1. Граф станів СМО з обмеженням по довжині черги

Алгебраїчні рівняння для фінальних імовірностей станів системи:

$$\begin{aligned}
 \lambda P_0 &= \mu P_{12}; \\
 (\lambda + v)P_{11} &= \lambda P_0 + 2\mu P_{22}; \\
 (\lambda + \mu)P_{12} &= vP_{11}; \\
 (\lambda + 2v)P_{21} &= \lambda(P_{11} + P_{12}) + 3\mu P_{32}; \\
 (\lambda + 2\mu)P_{22} &= vP_{21}; \\
 \dots & \dots \\
 (\lambda + mv)P_{m1} &= \lambda(P_{(m-1)1} + P_{(m-1)2}) + m\mu P_{(m+1)2}; \\
 (\lambda + m\mu)P_{m2} &= mvP_{m1}; \\
 \dots & \dots \\
 (\lambda + mv)P_{k1} &= \lambda(P_{(k-1)1} + P_{(k-1)2}) + m\mu P_{(k+1)2}; \\
 (\lambda + m\mu)P_{k2} &= mvP_{k1}; \\
 \dots & \dots \\
 mvP_{(m+\chi)1} &= \lambda(P_{(m+\chi-1)1} + P_{(m+\chi-1)2}); \\
 m\mu P_{(m+\chi)2} &= mvP_{(m+\chi)1};
 \end{aligned} \tag{3}$$

Нормуюча умова:

$$P_0 + \sum_{i=1, j=1}^{m+\chi} P_{ij} = 1.$$

Імовірності станів ерлангівської СМО:

$$\begin{aligned}
 P_{1e} &= P_{11} + P_{12}; \quad P_{2e} = P_{21} + P_{22}; \quad P_{ne} = P_{n1} + P_{n2}; \quad \dots \\
 P_{ne} &= P_{n1} + P_{n2}; \quad P_{(m+\chi)e} = P_{(m+\chi)1} + P_{(m+\chi)2}.
 \end{aligned}$$

Визначимо характеристики СМО:

$$\Lambda_e = \begin{pmatrix}
 -\lambda & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \lambda & -(\lambda + v) & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & v & -(\lambda + \mu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + 2v) & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 2v & -(\lambda + 2\mu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + 2v) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2v & -(\lambda + 2\mu) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + 2v) & 0 & 0 & 2\mu \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2v & -(\lambda + 2\mu) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -2v & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2v & -2\mu
 \end{pmatrix}$$

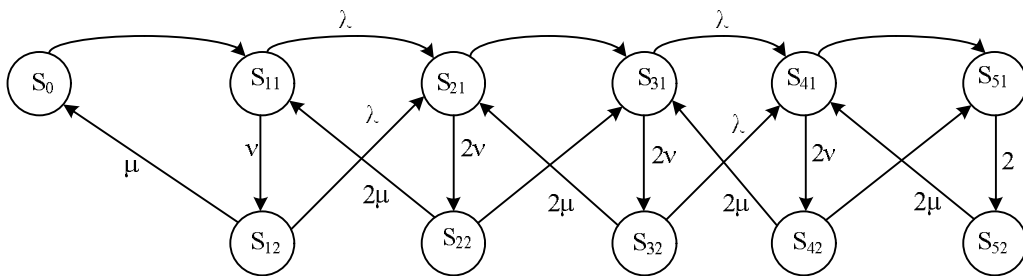


Рис. 2. Граф двоканальної СМО з трьома місцями у черзі

Імовірність обслуговування вимоги:

$$P_{лік} = 1 - P_{втр} = 1 - P_{відм}, \tag{4}$$

де

$$P_{втр} = P_{(m+\chi)e} -$$

$$- \sum_{i=2}^{m+\chi} P_{(i-1)2} / 2 = P_{(m+\chi)2} - \frac{P_{12} + P_{22} + \dots + P_{(m+\chi-1)2}}{2}.$$

Середнє число вимог, які знаходяться у черзі:

$$\bar{r} = \frac{1}{2} (1 \cdot P_{(m+1)e} + 2P_{(m+2)e} + \dots + \chi P_{(m+\chi)e}). \tag{5}$$

Середнє число вимог, які знаходяться у системі:

$$\bar{s} = \frac{1}{2} (1 \cdot P_{1e} + 2P_{2e} + \dots + (m + \chi)P_{(m+\chi)e}). \tag{6}$$

Середній час перебування вимоги у черзі:

$$\bar{t}_{черг} = \bar{r} / \lambda. \tag{7}$$

Середній час перебування вимоги у системі:

$$\bar{t}_{сист} = \bar{s} / \lambda. \tag{8}$$

Середнє число зайнятих приладів обслуговування:

$$\bar{k} = \frac{1}{2} (1 \cdot P_{1e} + 2P_{2e} + \dots + mP_{me} + \dots + mP_{(m+\chi)e}). \tag{9}$$

Дослідимо приклад функціонування такої системи на прикладі системи М/Е<sub>2</sub>/2/3, граф якої поданий на рис. 2, а матриця  $\Lambda_e$  інтенсивностей переходів цього графу буде такою:

Алгебраїчні рівняння для фінальних імовірностей станів системи:

$$\begin{aligned} \lambda P_0 &= \mu P_{12}; \\ (\lambda + \nu) P_{11} &= \lambda P_0 + 2\mu P_{22}; \\ (\lambda + \mu) P_{12} &= \nu P_{11}; \\ (\lambda + 2\nu) P_{21} &= \lambda P_{11} + 2\mu P_{32} + \lambda P_{12}; \\ (\lambda + 2\mu) P_{22} &= \nu P_{21}; \\ (\lambda + 2\nu) P_{31} &= \lambda P_{21} + 2\mu P_{42} + \lambda P_{22}; \\ (\lambda + 2\mu) P_{32} &= 2\nu P_{21}; \\ (\lambda + 2\nu) P_{41} &= \lambda P_{31} + 2\mu P_{52} + \lambda P_{32}; \\ (\lambda + 2\mu) P_{42} &= 2\nu P_{41}; \\ 2\nu P_{51} &= \lambda P_{41} + \lambda P_{42}; \\ 2\mu P_{52} &= 2\nu P_{51}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$P_0 + P_{11} + P_{12} + P_{21} + P_{22} + P_{31} + P_{32} + P_{41} + P_{42} + P_{51} + P_{52} = 1.$$

Імовірність станів ерлангівської СМО визначається:

$$P_{1e} = P_{11} + P_{12}; P_{2e} = P_{21} + P_{22}; P_{3e} = P_{31} + P_{32}; P_{4e} = P_{41} + P_{42}; P_{5e} = P_{51} + P_{52}.$$

Характеристики СМО:

$$P_{лік} = 1 - P_{втр} = 1 - P_{від}; P_{від} = P_{5e} - \frac{P_{12} + P_{22} + P_{32} + P_{42}}{2}.$$

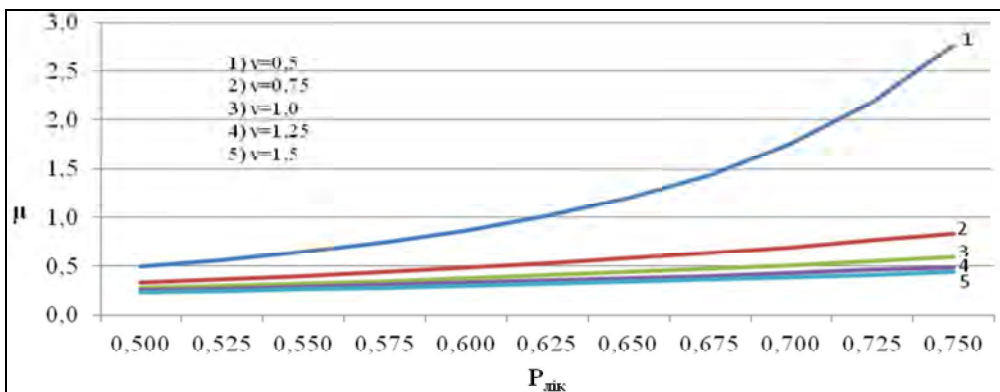


Рис. 3. Графік залежності  $\mu = f_1(P_{лік})$ .

При прийнятому діапазоні значень ймовірності успішної ліквідації наслідків екологічно небезпечної надзвичайної ситуації ( $0,5 \leq P_{лік} \leq 0,75$ ), зменшення часу зосередження локалізаційних підрозділів на

місці надзвичайної ситуації (збільшення значень  $\nu$ ) дає змогу застосування менше продуктивних засобів проведення ліквідаційних робіт. Більш детально це видно з графіку (рис. 4).

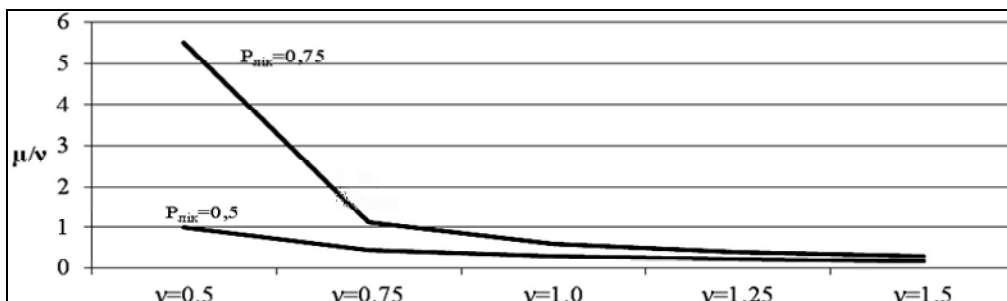


Рис. 4. Графік залежності  $\mu = f_2(\nu)$  при заданих значеннях  $P_{лік}$ .

При прийнятому діапазоні  $0,5 \leq P_{лік} \leq 0,75$  відношення  $\mu/\nu$  має нелінійний характер. Причому, при зменшенні  $\nu$  (до  $\nu = 0,5$ ) потреба у кратному збільшенні  $\mu$  зростає, що найбільше характерне для верх-

нього значення діапазону  $P_{лік}$ . Більш детально це подано на узагальненому графіку залежності ймовірності ліквідації наслідків екологічно небезпечної надзвичайної ситуації від параметрів СМО (рис. 5).

Середнє число вимог, які знаходяться у черзі:

$$\bar{r} = (1 \cdot P_{3e} + 2P_{4e} + 3P_{5e})/2. \quad (11)$$

Середнє число вимог, які знаходяться у системі:

$$\bar{s} = (1 \cdot P_{1e} + 2P_{2e} + 3P_{3e} + 4P_{4e} + 5P_{5e})/2.$$

Середній час перебування вимоги у черзі:

$$\bar{t}_{черг} = \bar{r}/\lambda.$$

Середній час перебування вимоги у системі:

$$\bar{t}_{сист} = \bar{s}/\lambda.$$

Середнє число зайнятих приладів обслуговування:

$$\bar{k} = \frac{1}{2}(1 \cdot P_{1e} + 2P_{2e} + 2P_{3e} + 2P_{4e} + 2P_{5e}).$$

Проведемо дослідження двоканальної СМО, зображеної на рис. 3. Для прийнятого діапазону значень  $0,5 \leq P_{лік} \leq 0,75$  визначимо значення параметрів СМО. При цьому проблемою є те, що кількість значень параметрів СМО ( $\lambda, \nu, \mu$ ) є нескінченною. Виходячи з цього, при прийнятому  $\lambda$  змінюємо покроково  $\nu$  та знаходимо значення  $\mu$ , при яких  $P_{лік}$  дорівнює значенням з прийнятого діапазону.

На рис. 3 наведений графік залежності

$$\mu = f_1(P_{лік}).$$

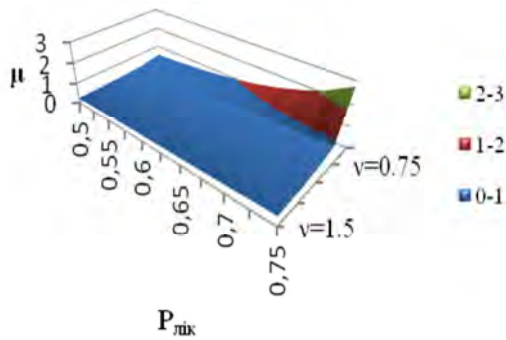


Рис. 5. Узагальнений графік залежності ймовірності ліквідації наслідків екологічно-небезпечної надзвичайної ситуації від параметрів СМО

Особливої уваги заслуговує залежність ймовірності негативного впливу на навколишнього природне середовища ( $P_{ni}$ ) від значень  $\lambda$ ,  $v$ ,  $\mu$ . Графік залежності  $P_{ni} = f_3(\mu)$  поданий на рис. 6.

Відомо, що значення продуктивності роботи технічних засобів ліквідації екологічно небезпечних наслідків надзвичайної ситуації знаходиться у визначених їхніми технічними характеристиками межах ( $\mu_{min_i} \leq \mu_i \leq \mu_{max_i}$ ). При  $\mu_i \leq \mu_{min_i}$ , навіть при умові найкоршого зосередження ліквідаційних

підрозділів на місці надзвичайної ситуації, ймовірність  $P_{ni}$  залишається високою. Існують такі значення  $\mu_i = \mu_{min_i}$  та  $v = v_{max}$ , коли  $\mu_i$  є постійною величиною, тобто продуктивності вкрай недостатньо. При ( $\mu_{min_i} \leq \mu_i \leq \mu_{max_i}$ ) із збільшенням  $v$  величина  $P_{ni}$  зменшується. При  $\mu > \mu_{max_i}$  і великому значенні часу зосередження, величина  $P_{ni}$  є відносно великою, тобто зосередження є недоцільним.

Інакше кажучи, якщо засоби ліквідації наслідків надзвичайної ситуації не відповідають її характеру та/або вкрай малопродуктивні, то навіть при їх вчасному зосередженні на місці ліквідації вони не будуть ефективними. З іншого боку, навіть якщо засоби ліквідації достатньо ефективні, але зосередження їх на місці ліквідації відбулося із запізненням, то вони також не дадуть ефекту. Значну увагу до себе привертає проблема негативного впливу на навколишнє природне середовище при різній тривалості проведення робіт ліквідаційними підрозділами.

На рис. 7 поданий графік залежності тривалості часу ліквідаційних робіт від величини продуктивності технічних засобів ліквідації, тобто знаходженні вимоги у СМО при повному циклі її обробки.

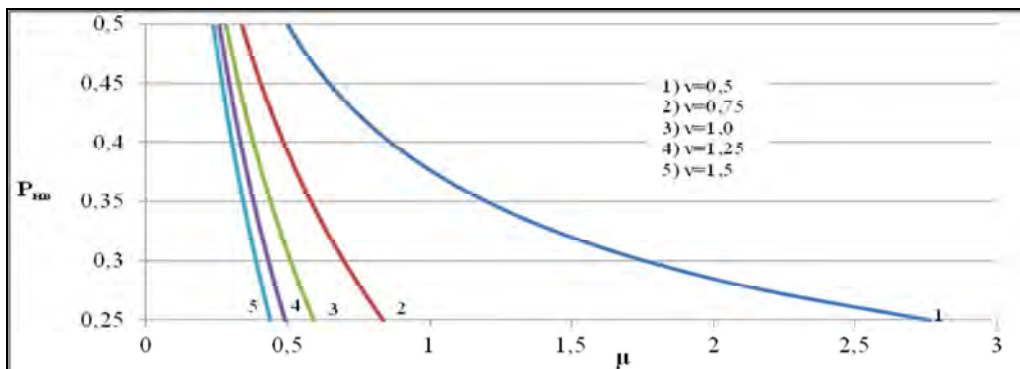


Рис. 6. Графік залежності  $P_{ni} = f_3(\mu)$  при різних значеннях  $v$

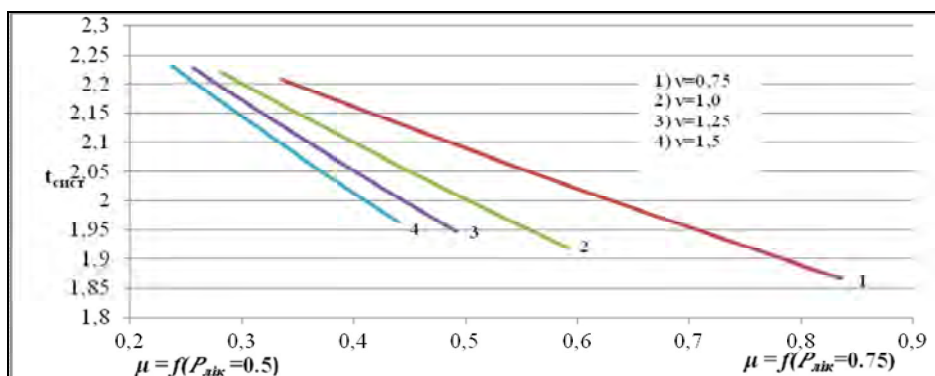


Рис. 7. Графік залежності  $t_{сист} = f_4(\mu)$  при різних значеннях  $v$  у прийнятному діапазоні значень  $0,5 \leq P_{лик} \leq 0,75$

З рис. 7 видно, що суттєве зменшення терміну проведення ліквідаційних робіт, а також негативного впливу наслідків екологічно небезпечної надзвичайної ситуації на навколишнє природне середовище можливе при зменшенні часу зосередження підрозді-

лів та застосуванні відповідних сил і засобів. Збільшення часу зосередження потребує збільшення продуктивності таких сил та засобів у рази. Розглянемо функціонування двокомпонентної СМО як функціонування двох ліквідаційних підрозділів (рис. 8).

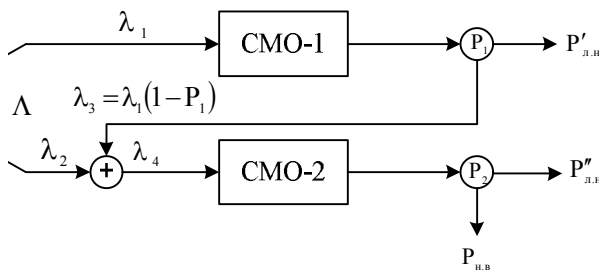


Рис. 8. Схема двокомпонентної СМО з послідовним з'єднанням компонент

На вхід двокомпонентної СМО надходить простіший вхідний потік  $\Lambda$ , який є суперпозицією двох простіших потоків  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ , тобто  $\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ .

Після відмови у СМО-1 потік відмов з інтенсивністю  $\lambda_3 = \lambda_1(1 - P_1)$  негайно надходить на вхід СМО-2. На вхід СМО-2 або надходять вимоги потоку з інтенсивністю  $\lambda_1$ , або потоку з інтенсивністю  $\lambda_3$ . Ймовірність одночасного надходження двох вимог з різних потоків дорівнює нулю. При заданих межах ймовірності ліквідації екологічно небезпечних наслідків надзвичайної ситуації з небезпечними вантажами ( $0,8 \leq P_{лн} \leq 0,95$ ) визначимо ймовірності ліквідації надзвичайної ситуації СМО = 1 ( $P'_л$ ) та СМО-2 ( $P''_л$ ) із співвідношення:

$$(1 - P_{лн}) = (1 - P'_л)(1 - P''_л),$$

звідки:  $P_л = 1 - (1 - P'_л)(1 - P''_л)$ .

Задамо значення  $P'_л$  та  $P''_л$  і визначимо  $P_1$  та  $P_2$  із співвідношень:

$$P'_л = \lambda_1 P_1; \quad P''_л = \lambda_4 P_2,$$

тоді:  $P_1 = \frac{P'_л}{\lambda_1}; \quad P_2 = \frac{P''_л}{\lambda_2 + \lambda_1(1 - P_1)}$ .

При прийнятих значеннях  $\lambda_1, \lambda_2, \mu_1$  та  $\mu_2$  визначимо значення  $\nu_1$  та  $\nu_2$ .

Розрахунок проведемо за допомогою програми Mathad MS Exel (пакет «Аналізу»).

Компоненти СМО являють собою системи масового обслуговування M/E<sub>2</sub>/1/3. Граф СМО-1 та СМО-2 наданий на рис. 9.

Матриця  $\Lambda_e$  інтенсивностей переходів такої СМО буде:

$$\Lambda_e = \begin{pmatrix} -\lambda & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & -(\lambda + \nu) & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & -(\lambda + \mu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + \nu) & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \nu & -(\lambda + \mu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + \nu) & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu & -(\lambda + \mu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu - \mu & 0 \end{pmatrix}$$

Алгебраїчні рівняння для фінальних ймовірностей станів СМО:

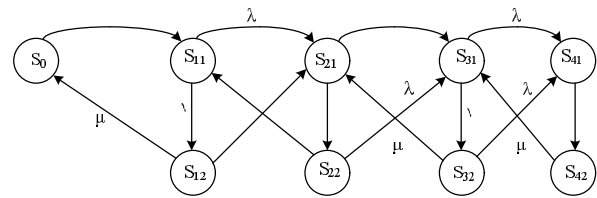


Рис. 9. Граф компонент СМО

$$\begin{aligned} \lambda P_0 &= \mu P_{12}; \\ (\lambda + \nu)P_{11} &= \lambda P_0 + 2\mu P_{22}; \\ (\lambda + \mu)P_{12} &= \nu P_{11}; \\ (\lambda + 2\nu)P_{21} &= \lambda P_{11} + 2\mu P_{32} + \lambda P_{12}; \\ (\lambda + 2\mu)P_{22} &= 2\nu P_{21}; \\ (\lambda + 2\nu)P_{31} &= \lambda P_{21} + 2\mu P_{42} + \lambda P_{22}; \\ (\lambda + 2\mu)P_{32} &= 2\nu P_{31}; \\ \lambda P_{41} &= \lambda P_{31} + \lambda P_{32}; \\ \lambda P_{42} &= \nu P_{41}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$P_0 + P_{11} + P_{12} + P_{21} + P_{22} + P_{31} + P_{32} + P_{41} + P_{42} = 1.$$

Ймовірність станів ерлангівської СМО визначається:

$$P_{1e} = P_{11} + P_{12}; \quad P_{2e} = P_{21} + P_{22};$$

$$P_{3e} = P_{31} + P_{32}; \quad P_{4e} = P_{41} + P_{42}.$$

Характеристики СМО:

$$P_{лік} = 1 - P_{утр} = 1 - P_{відм},$$

$$P_{відм} = P_{4e} - \frac{P_{12} + P_{22} + P_{32}}{2}.$$

Середнє число вимог, які знаходяться у черзі:

$$\bar{r} = \frac{1}{2}(1 \cdot P_{2e} + 2P_{3e} + 3P_{4e}). \quad (13)$$

Середнє число вимог, які знаходяться у системі:

$$\bar{s} = \frac{1}{2}(1 \cdot P_{1e} + 2P_{2e} + 3P_{3e} + 4P_{4e}).$$

Середній час перебування вимоги у черзі:

$$\bar{t}_{черг} = \bar{r} / \lambda.$$

Середній час перебування вимоги у системі:

$$\bar{t}_{сист} = \bar{s} / \lambda.$$

Середнє число зайнятих приладів обслуговування:

$$\bar{k} = \frac{1}{2}(1 \cdot P_{1e} + 1P_{2e} + 1P_{3e} + 1P_{4e}).$$

Графіки залежності  $P_{лн} = f_5(\nu)$  з урахуванням прийнятого діапазону для  $P_{лік}$  надані на рис. 10. На графіку безперервними лініями показані залежності СМО-1, а пунктирними лініями – СМО-2. Як видно з графіку (рис. 10), із збільшенням величини продуктивності СМО-1 та СМО-2, інтенсивність зосередження зменшується. При заданих значеннях  $\mu$  та із збільшенням величини  $P_{лн}$ ,  $\nu$  збільшується за нелінійним законом. Забезпечення визначеної ймовірності  $P_{лн}$  можна досягнути за рахунок різних параметрів СМО-1 та СМО-2: або шляхом збільшення продуктивності ліквідаційних сил і засобів, або зменшення часу зосередження. Причому, вимоги до параметрів СМО-2 є суттєво меншими чим до параметрів СМО-1.

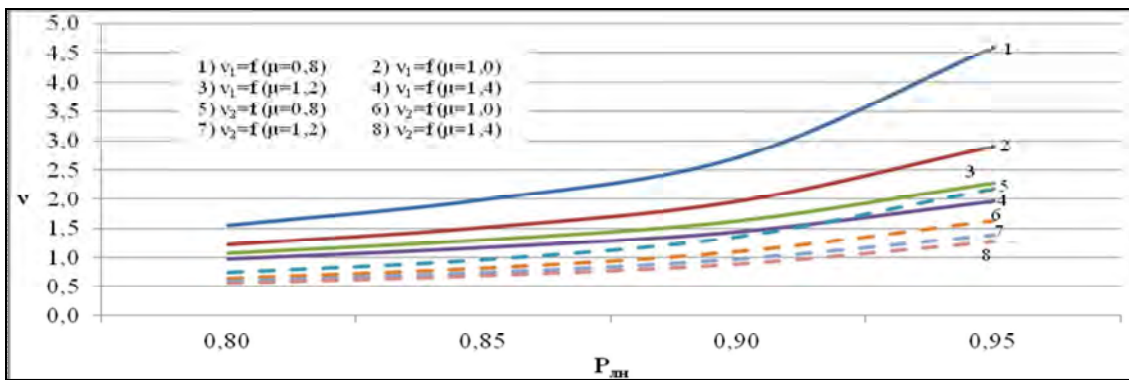


Рис. 10. Графіки залежності  $P_{лн} = f_3(v)$  з урахуванням прийнятого діапазону для  $P_{лік}$

### Висновки

Таким чином, запропонований підхід до дослідження наслідків екологічно небезпечних залізничних транспортних подій з небезпечними вантажами:

- є методологічною основою створення та розвитку СППР керівника оперативної групи з ліквідації наслідків таких подій в єдиній автоматизованій системі керування вантажними перевезеннями залізниць;
- дає можливість сформулювати обґрунтовані вимоги щодо дислокації відновлювальних та пожежних підрозділів на мережі залізниць, їх оснащення та рівня професійної підготовки керівних кадрів та обслуговуючого персоналу;
- визначити ймовірність та тривалість негативного впливу екологічно-небезпечної надзвичайної ситуації на навколишнє природне середовище.

### Список літератури

1. Кацман М.Д. Типові аварійні ситуації з небезпечними вантажами та їх вплив на рухомий склад, об'єкти залізниць і навколишнє природне середовище / М.Д. Кацман, М.І. Адаменко, Ю.О. Куліш // Матеріали IV Міжнародної НПКі «Маркетинг і логістика в системі менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті», 23-25.09.2014, Одеса. – С. 129-132.
2. Оцінювання і прогнозування надзвичайних ситуацій на транспорті / М.Д. Кацман, В.К. Мироненко, О.Г. Родкевич, О.Г. Стрелко // Матеріали IV Міжнародної НПК «Безпека життєдіяльності людини як умова

сталого розвитку сучасного суспільства». – МАБЖД, Академія муніципального управління. – К., 2011. – С. 300-302.

3. Мироненко В.К. Науково-методичні підходи до оцінки безпечності системи залізничних перевезень пасажирів і вантажів / В.К. Мироненко, М.Д. Кацман, О.Г. Родкевич // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Маркетинг і логістика в системі менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті». – К.: Укрзалізниця, 2011. – С. 120-122.
4. Кацман М.Д. Досвід автоматизації управління підрозділами воєнізованої охорони залізниць / М.Д. Кацман, В.В.Малицький // Матеріали другої міжнародної НТК «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». – К.: ДП «ЦНДІ НіУ», Х.: ДП «ХНДІ ТМ», К.: КДАВТ, 15-16 грудня 2011. – С. 60.
5. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – 2 изд. стер. – М.: Вिसш.шк., 2000.
6. Шуенкин В.А. Прикладные модели теории массового обслуживания / В.А. Шуенкин, В.С. Донченко. – К.: УМКВО. Учебно-методический кабинет высшего образования, 1992. – 188 с.
7. Денисов А.А. Теория больших систем управления / А.А. Денисов, Д.Н. Колесников. – М.: Энергоиздат, 1982. – 268 с.
8. Ушаков И.А. Вероятностные модели надежности информационно-вычислительных систем / И.А. Ушаков. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.

Надійшла до редколегії 26.01.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СОБЫТИЙ

М.Д. Кацман, В.К. Мироненко, В.И. Мацюк

В статье рассмотрены математические модели процессов развития железнодорожных транспортных событий с опасными грузами. Предложены новые подходы к рациональному расположению ликвидационных подразделений на сети железных дорог и определению эффективности действий таких подразделений для достижения минимального экологического убытка и потери грузов.

**Ключевые слова:** математические модели, железнодорожные транспортные события, опасные грузы, экологический убыток, ликвидационные подразделения.

### MATHEMATICAL MODELS ECOLOGICALLY HAZARDOUS RAILWAY TRANSPORT OCCURRENCES

M.D. Katsman, V.K. Mironenko, V.I. Masyuk

In the article the mathematical models of processes of development of railway transport events are considered with dangerous loads. The new going is offered near the rational location of the liquidating subdividing into a trackage and determination of efficiency of actions of such subdivisions for achievement of minimum ecological loss and loss of loads.

**Keywords:** mathematical models, railway transport events, dangerous loads, ecological loss, liquidating subdivisions.