

М.Д. Кацман, інж.
Південно-Західна залізниця
С.В. Юхимчук, д.т.н., проф.
Вінницький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ДІЙ ПОЖЕЖНИХ ПІДРОЗДІЛІВ ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ НА РУХОМОМУ СКЛАДІ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Запропоновано математичні моделі, що базуються на теорії систем масового обслуговування, які дозволяють оцінювати ефективність дій пожежних підрозділів при ліквідації пожеж на рухомому складі залізничного транспорту.

1. Постановка проблеми

Залізничний транспорт – важлива ланка народного господарства країни, на долю якої припадає більше 70 % перевезень, що здійснюються усіма видами транспорту.

Аналіз аварійних ситуацій, які мали місце на залізничному транспорті при перевезенні скраплених вуглеводневих газів, легкозаймистих речовин, горючих рідин та твердих горючих матеріалів, показує, що кожна аварія може мати два принципових варіанти розвитку:

- аварія без пожежі (перекидання вагона, сходження з рейок, розливання або витік небезпечних вантажів тощо);
- аварія, яка супроводжується пожежею (горіння цистерни, горіння продукту, що витікає або розливається, горіння інших вагонів та стаціонарних споруд тощо).

Практика показує, що найбільш складними та небезпечними аваріями, які мали місце на залізничному транспорті при перевезенні небезпечних речовин, є такі, що пов'язані з пожежею, бо в цьому випадку ліквідація наслідків аварії пов'язана, в першу чергу, з необхідністю ліквідації горіння. Тільки після ліквідації пожежі можливе проведення усього комплексу робіт, необхідних для ліквідації наслідків аварії та відновлення руху поїздів [1], [2].

До гасіння пожежі, яка сталася у рухомому складі або на об'єкті залізничного транспорту, залучаються підрозділи Державної пожежної охорони та пожежні підрозділи відомчої охорони залізниць. Залучення цих підрозділів здійснюється на підставі плану взаємодії Державної пожежної охорони та воєнізованої охорони залізниці [3], [4].

Але нині відсутні математичні моделі оцінювання ефективності дій пожежних підрозділів при ліквідації пожеж на рухомому складі залізничного транспорту.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми

Дослідження пожеж показує, що на період зосередження сил та засобів для гасіння пожежі припадає найбільша частка збитків від пожежі. Це особливо характерно для пожеж, на гасіння яких залучаються декілька пожежних підрозділів. Термін часу зосередження сил та засобів припадає у більшості випадків на той період їх вільного розвитку, коли швидкість зростання площі пожежі, швидкість вигорання або інші параметри пожежі, які визначають збитки, мають максимальні значення [5].

Для оперативного керівництва ліквідацією аварійної ситуації у дирекціях залізничних перевезень та управліннях залізниць створюються оперативні групи за участю керівників провідних служб із залученням, у необхідних випадках, фахівців відправника (одержувача).

Керівники оперативних груп разом із представниками територіальних служб з питань надзвичайних ситуацій та цивільного захисту населення, міністерств охорони здоров'я, надзвичайних ситуацій, внутрішніх справ та ін. оперативно розробляють та виконують план реагування на аварійну ситуацію [3], [6], [7], [8].

Одним з важливих розділів плану є визначення сил та засобів для ліквідації наслідків аварії та гасіння пожежі і порядку їх використання.

Згідно з прийнятою класифікацією пожеж, методика розрахунку сил та засобів для різних класів пожеж буде різною, наприклад, за видами пожеж або за способом гасіння тощо.

Розрахунок сил та засобів здійснюється аналітичним способом або за допомогою таблиць, графіків та пожежно-тактичних експонетрів.

Аналітичний спосіб розрахунку є базовим, найбільш повним та точним, а всі інші ґрунтуються на цьому способі, проте цей спосіб є найбільш тривалим.

Основними групами вихідних даних для розрахунку сил та засобів є: оперативно-тактична характеристика об'єкта; параметри і умови розвитку пожежі; параметри та умови гасіння пожеж та напрямки введення сил та засобів на гасіння.

Існує низка методик аналітичного обліку сил та засобів для гасіння пожеж [5], [8], [9].

Але існуючі методики не дають можливість визначити успішність дій пожежних підрозділів при призначенні їх для ліквідації пожежі на той чи інший об'єкт.

Тому виникає потреба у розв'язанні задачі визначення доцільності та ефективності проведення бойових дій пожежними підрозділами щодо гасіння пожежі на визначеному об'єкті залізничного транспорту.

Проведений аналіз літературних джерел [10–15] дозволив зробити висновок, що на розв'язання задач в такій постановці не звертається особлива увага, хоча важливість таких задач відзначається в [16].

3. Розробка математичної моделі

Для розв'язання цієї задачі у даній роботі запропонована відповідна математична модель, що базується на методах теорії масового обслуговування.

Розглянемо об'єкт (рухомий склад) залізничного транспорту, що потерпає від пожежі, як систему масового обслуговування.

Для ліквідації пожежі, згідно з розрахунком, надходить визначена кількість пожежних підрозділів.

Враховуючи те, що тактико-технічні характеристики пожежної техніки значно перевищують фізичні можливості їх бойової обслуги, для здійснення бойового розгортання та виконання деяких операцій при гасінні пожежі використовується особовий склад інших підрозділів, що також прибувають на пожежу. Це враховується при визначенні кількості пожежних підрозділів.

Потік пожежних відділень λ приймається простішим [17]:

$$\lambda = \frac{1}{T_{\sigma}}. \quad (1)$$

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

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (t > 0). \quad (2)$$

Інтервал часу T_{σ} визначимо співвідношенням:

$$T_{\sigma} = \tau_{\text{внк}} + \tau_{\text{зб}} + \tau_{\text{пр}}, \quad (3)$$

де $\tau_{\text{внк}}$ – проміжок часу від початку виникнення пожежі до сповіщення про неї у пожежну охорону; $\tau_{\text{зб}}$ – термін часу збору особового складу бойової обслуги за тривоги; $\tau_{\text{пр}}$ – термін часу прямування підрозділів на пожежу.

Після прибуття на місце пожежі підрозділи здійснюють бойове розгортання – приведення сил та засобів у стан готовності для виконання бойових дій на пожежі.

Швидкість бойового розгортання певною мірою залежить від умов та обставин на пожежі, фізичної натренованості, виучки та психологічної підготовки бойової обслуги пожежних підрозділів, прийнятої схеми бойового розгортання, типу та виду пожежних стволів, їх розташування, способів і прийомів бойового розгортання.

Інтенсивність бойового розгортання μ_0 [17]:

$$\mu_0 = \frac{1}{\tau_{\text{бр}}},$$

де $\tau_{\text{бр}}$ – середній термін часу бойового розгортання підрозділів пожежної охорони.

Термін часу бойового розгортання є випадковою величиною, розподіленою за показниковим законом з параметром μ_0 [17]:

$$F(t) = \mu_0 \cdot e^{-\mu_0 t}, \quad (t > 0). \quad (4)$$

Параметр μ_0 визначається з умови розгортання необхідної кількості пожежних машин мінімальною кількістю особового складу бойової обслуги.

Тривалість бойового розгортання регламентується нормативами з пожежно-стройової підготовки [7].

Після закінчення бойового розгортання на пожежу подається визначена кількість стволів, що діють як один, тобто інтенсивність простішого потоку вогнегасних речовин для гасіння пожежі є деяка функція $\mu_r = \varphi(n_r)$ кількості засобів пожежогасіння n_r , які одночасно "обслуговують" гасіння пожежі на об'єкті.

Гасіння пожежі здійснюється протягом випадкового часу T_r , що розподілений за показниковим законом з параметром μ_r [17]:

$$f(t) = \mu_r e^{-\mu_r t} = n_r \mu_{r_1} e^{-n_r \mu_{r_1} t}, \quad (t > 0), \quad (5)$$

де μ_r – інтенсивність гасіння пожежі одним засобом пожежогасіння;

n_r – кількість стволів, необхідних для гасіння пожежі.

$$\mu_{r_1} = \frac{1}{n_r \bar{t}_r}, \quad (6)$$

де \bar{t}_r – нормативний проміжок часу гасіння пожежі – оптимально встановлений період безпосереднього гасіння при заданій інтенсивності подавання вогнегасної речовини.

Нормативний (розрахунковий) термін часу визначають дослідним шляхом з урахуванням аналізу пожеж, які були ліквідовані. Цей термін часу вказаний у відповідних документах щодо гасіння пожеж.

Так, тривалість гасіння горловини цистерни, що горить, повітряно-механічною піною складає 10 хв., рідини, що розлилася, – 10 хв. тощо [2].

Охолодження об'єкта здійснюється протягом випадкового часу T_{ox} , що також розподілений за показниковим законом з параметром μ_{ox} [17]:

$$f(t) = \mu_{ox} e^{-\mu_{ox} t} = n_{ox} \mu_{ox_1} e^{-n_{ox} \mu_{ox_1} t}, \quad (t > 0), \quad (7)$$

де μ_{ox} – інтенсивність охолодження об'єкта одним засобом подавання охолоджуючої речовини;

n_{ox} – кількість засобів подавання охолоджуючої речовини.

$$\mu_{ox_1} = \frac{1}{n_{ox} \bar{t}_{ox}}, \quad (8)$$

де \bar{t}_{ox} – нормативний проміжок часу охолодження об'єкта. Наприклад, нормативний (розрахунковий) термін охолодження вагона складає на станції 75 хв., на перегоні – 105 хв. [2].

Згідно з проведеними розрахунками на об'єкті необхідно зосередити n_r стволів для гасіння та n_{ox} стволів для охолодження, що повинні бути доставлені на об'єкт відповідно k_r відділеннями для гасіння пожежі та k_{ox} відділеннями для охолодження об'єкта. Кількість відділень враховує й необхідну кількість бойової обслуги для здійснення відповідної роботи на пожежі.

Гасіння пожежі та охолодження об'єкта здійснюється негайно після бойового розгортання пожежної техніки бойовою обслугою.

Важливою характеристикою об'єкта є ще й обмеження на термін перебування об'єкта у зоні пожежі, тобто накладається обмеження на час "обслуговування" об'єкта засобами пожежогасіння.

Цей термін часу є випадковим та підпорядковується показниковому закону розподілення з параметром η [17]:

$$\eta = \frac{1}{t_{об}}, \quad (9)$$

де $t_{об}$ – середній термін часу до руйнування рухомого складу (об'єкта).

Розглянемо об'єкт, що потерпає від пожежі, як систему масового обслуговування (СМО).

Будемо вважати, що ця СМО являє собою накопичувач з обмеженим терміном обслуговування заявок.

Кількість місць n у накопичувачі дорівнює сумі кількості пожежних відділень, необхідних для гасіння пожежі та охолодження об'єкта:

$$n = K_r + K_{ox}. \quad (10)$$

Визначимо диференціальні рівняння, що описують імовірні стани такої СМО.

Позначимо: $P_0(t)$ – ймовірність того, що у накопичувачі нема жодної заявки; $P_1(t)$ – ймовірність того, що у накопичувачі є одна заявка; $P_m(t)$ – ймовірність того, що у накопичувачі є m заявок $m \leq n$.

Складемо диференціальні рівняння для усіх ймовірностей $P_m(t)$, використовуючи введені параметри (1) + (9).

Знайдемо $P_0(t + \Delta t)$. Вона буде з точністю до нескінченно малих більш високого порядку, ніж Δt дорівнювати сумі таких складових:

– ймовірності того, що у момент t у накопичувачі не було заявок та за час Δt жодна з них не надходила:

$$(1 - \lambda \Delta t) \cdot P_0(t); \tag{11}$$

– ймовірності того, що у накопичувачі знаходилося n заявок та за термін часу Δt вони були обслужені (пожежа на об'єкті ліквідована n відділеннями) або усі заявки залишили СМО по закінченні часу, що обмежує термін їх обслуговування (об'єкт зруйнувався під дією небезпечних факторів пожежі):

$$(c_1 \mu_{\Gamma_1} + \eta) \Delta t P_1(t) + \dots + (n_{\Gamma} \mu_{\Gamma_n} + \eta) \Delta t P_n(t) + (q_1 \mu_{ox_1} + \mu_{\Gamma} + \eta) \Delta t P_s(t) + \dots + (\mu_{ox} + \mu_{\Gamma} + \eta) \Delta t P_n(t). \tag{12}$$

Якщо врахувати (11) і (12), то

$$P_0(t + \Delta t) = (1 - \lambda \Delta t) P_0(t) + (c_1 \mu_{\Gamma_1} + \eta) \Delta t P_1(t) + \dots + (n_{\Gamma} \mu_{\Gamma_1} + \eta) \Delta t P_s(t) + (q_1 \mu_{ox_1} + \mu_{\Gamma} + \eta) \Delta t P_s(t) + \dots + (\mu_{ox} + \mu_{\Gamma} + \eta) \Delta t P_n(t), \tag{13}$$

тоді

$$P_0'(t) = -\lambda P_0(t) + (c_1 \mu_{\Gamma_1} + \eta) P_1(t) + \dots + (\mu_{\Gamma} + \mu_{ox} + \eta) P_n(t), \tag{14}$$

де c_1 – кількість стволів для гасіння пожежі у першому відділенні, яке призначене для гасіння пожежі; q_1 – кількість стволів для охолодження у першому відділенні, яке призначене для охолодження об'єкта.

Аналогічні диференціальні рівняння можуть бути визначені й для ймовірностей $P_m(t)$, де $1 \leq m < n$.

Ймовірність $P_m(t + \Delta t)$ при $1 \leq m < n$ дорівнює сумі таких ймовірностей:

– ймовірності того, що у накопичувачі було m заявок та за термін часу Δt жодна з них не надходила і вони або були обслужені, або залишили систему:

$$(1 - \lambda \Delta t)(1 - \mu_{\Gamma_1} e_{\Gamma} \Delta t)(1 - \omega_{ox_1} \mu_{ox_1} \Delta t)(1 - \eta \Delta t) P_m; \tag{15}$$

– ймовірність того, що у момент t у накопичувачі було $(m-1)$ заявок та за термін часу Δt надійшла ще одна:

$$\lambda \Delta t P_{m-1}(t). \tag{16}$$

Якщо враховувати (15) і (16), то

$$P_m(t + \Delta t) = (1 - \lambda \Delta t)(1 - e_{\Gamma} \mu_{\Gamma_1} \Delta t)(1 - \omega_{ox_1} \mu_{ox_1} \Delta t)(1 - \eta \Delta t) P_m(t) + \lambda \Delta t P_{m-1}(t), \tag{17}$$

тоді

$$P_m'(t) = -(\lambda + e_{\Gamma} \mu_{\Gamma_1} + \omega_{ox_1} \mu_{ox_1} + \eta) P_m(t) + \lambda P_{m-1}(t). \tag{18}$$

Ймовірність $P_n(t + \Delta t)$ дорівнює сумі таких ймовірностей:

– ймовірності того, що у момент t у системі було n заявок та за час Δt не було закінчення їх обслуговування або вони залишили систему:

$$(1 - \mu_{\Gamma} \Delta t)(1 - \mu_{ox} \Delta t)(1 - \eta \Delta t) P_n(t); \tag{19}$$

– ймовірності того, що у момент t у накопичувачі було $(n-1)$ заявок та за час Δt надійшла ще одна:

$$\lambda \Delta t P_{n-1}(t). \tag{20}$$

Звідки

$$P_n(t + \Delta t) = (1 - \mu_{\Gamma} \Delta t)(1 - \mu_{ox} \Delta t)(1 - \eta \Delta t) P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t), \tag{21}$$

тоді

$$P_n'(t) = -(\mu_{\Gamma} + \mu_{ox} + \eta) P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t). \tag{22}$$

Таким чином, система диференціальних рівнянь, яка описує ймовірні стани СМО об'єкта, що потерпає від пожежі, буде мати вигляд:

$$\begin{cases} P_0'(t) = -\lambda P_0(t) + (c_1 \mu_{r_1} + \eta) P_1(t) + \dots + (\mu_r + \mu_{ox} + \eta) P_n(t), \\ P_m'(t) = -(\lambda + e_r \mu_{r_1} + \omega_{ox} \mu_{ox_1} + \eta) P_m(t) + \lambda P_{m-1}(t) \quad (1 \leq m \leq n), \\ P_n'(t) = -(\mu_r + \mu_{ox} + \eta) P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t). \end{cases} \quad (23)$$

При $t \rightarrow \infty$ система диференціальних рівнянь (23) перетворюється у систему алгебраїчних рівнянь вигляду:

$$\begin{cases} -\lambda P_0 + (c_1 \mu_{r_1} + \eta) P_1 + \dots + (\mu_r + \mu_{ox} + \eta) P_n = 0, \\ -(\lambda + c_1 \mu_{r_1} + \eta) P_1 + \lambda P_0 = 0, \\ -(\lambda + \mu_{r_1} + e_r + \omega_{ox} \mu_{ox_1} + \eta) P_m + \lambda P_{m-1} = 0, \\ -(\mu_r + \mu_{ox} + \eta) P_n + \lambda P_{n-1} = 0. \end{cases} \quad (24)$$

Зрозуміло, що повинні виконуватись умови нормування:

$$\sum_{i=0}^n P_i = 1.$$

Система масового обслуговування, яка описує пожежні підрозділи, що прибувають на пожежу, являє собою замкнену n – каналну СМО з інтенсивністю обслуговування μ_0 . СМО такого типу докладно описані у [10], [12], [18].

Спільна робота систем масового обслуговування “пожежні підрозділи – об'єкт (рухомий склад), що потерпає від пожежі”, може бути досліджена за допомогою стохастичних сіткових моделей [15], [19], [20].

З умов функціонування такої системи можна виявити її важливі особливості: кількість заявок (пожежних підрозділів) обмежена та дорівнює n , не допускається надходження підрозділів ззовні мережі та виходи їх за границі мережі. Тобто вона являє собою замкнену стохастичну мережу.

Виходячи з того, що кількість заявок у цій мережі обмежена, замкнена мережа завжди має стаціонарний режим, у якому інтенсивності потоків на вході та виході будь-якої СМО мережі однакові та незмінні протягом певного часу.

Розрахунок характеристик замкненої стохастичної мережі проводиться у припущенні того, що тривалість обслуговування заявок у СМО, які входять до мережі, є випадковими величинами, що розподілені за експоненціальним законом.

Важливим обґрунтуванням схеми дослідження такої мережі є ще й те, що вона може розглядатися як сукупність незалежних СМО з простішими вхідними потоками [19].

Розглянемо мережу, яка наведена на рис. 1.

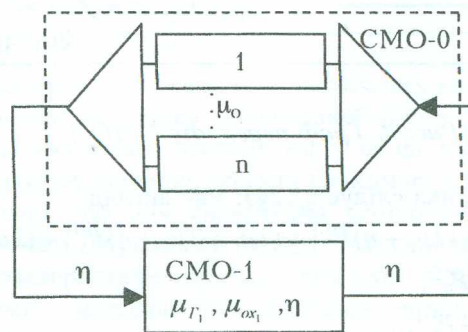


Рис. 1. Замкнена стохастична мережна системи “пожежні підрозділи – об'єкт (рухомий склад), що потерпає від пожежі”

На рис. 1. СМО-0 являє собою пожежні підрозділи, які прибувають на пожежу, а СМО-1 – об'єкти, що потерпають від пожежі.

Дослідження цієї мережі у загальному вигляді є складною математичною задачею, тому розглянемо характерний приклад.

Припустимо, що кількість пожежних підрозділів, які беруть участь у гасінні пожежі $n = 4$, інтенсивність надходження визначеної кількості пожежних підрозділів $\lambda = 0,09$, інтенсивність бойового розгортання $\mu_0 = 0,04$, інтенсивність гасіння пожежі $\mu_{г_1} = 0,05$, інтенсивність охолодження $\mu_{ox_1} = 0,025$ та інтенсивність руйнування об'єкта (рухомого складу) $\eta = 0,06$.

Граф переходів СМО-0 наведений на рис. 2.

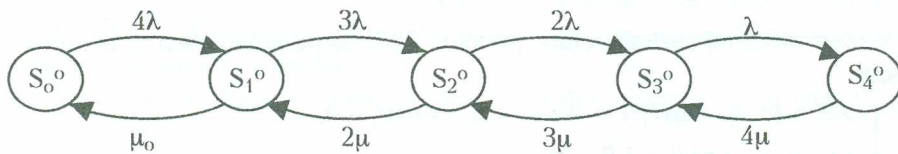


Рис. 2. Граф переходів СМО-0

Система алгебраїчних рівнянь, що описують ймовірності станів СМО-0, як слідує з вищевикладеного, має вигляд:

$$\begin{cases} 4\lambda P_0^{(0)} = \mu_0 P_1^{(0)}, \\ (3\lambda + \mu_0)P_1^{(0)} = 4\lambda P_0^{(0)} + 2\mu_0 P_2^{(0)}, \\ (2\lambda + 2\mu_0)P_2^{(0)} = 3\lambda P_1^{(0)} + 3\mu_0 P_3^{(0)}, \\ (\lambda + 3\mu_0)P_3^{(0)} = 2\lambda P_2^{(0)} + 4\mu_0 P_4^{(0)}. \end{cases} \quad (25)$$

При цьому

$$P_0^{(0)} + P_1^{(0)} + P_2^{(0)} + P_3^{(0)} + P_4^{(0)} = 1.$$

З (25) просто знайти ймовірності станів СМО-0:

$$\begin{aligned} P_1^{(0)} &= \frac{4\lambda}{\mu_0} P_0^{(0)}; & P_2^{(0)} &= \frac{6\lambda^2}{\mu_0^2} P_0^{(0)}; & P_3^{(0)} &= \frac{4\lambda^3}{\mu_0^3} P_0^{(0)}; \\ P_4^{(0)} &= \frac{\lambda^4}{\mu_4} P_0^{(0)}; \\ P_0^{(0)} &= \left(1 + \frac{4\lambda}{\mu_0} + \frac{6\lambda^2}{\mu_0^2} + \frac{4\lambda^3}{\mu_0^3} + \frac{\lambda^4}{\mu_0^4}\right)^{-1}. \end{aligned} \quad (26)$$

Граф переходів СМО-1 наданий на рис. 3.

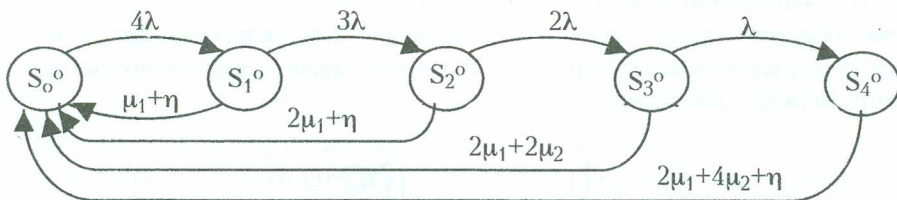


Рис. 3. Граф переходів СМО-1

Система алгебраїчних рівнянь, яка слідує з (24), має вигляд:

$$\begin{cases} 4\lambda P_0^{(1)} = (\mu_1 + \eta)P_1^{(1)} + (2\mu_1 + \eta)P_2^{(1)} + (2\mu_1 + 2\mu_2 + \eta)P_3^{(1)} + (2\mu_1 + 4\mu_2 + \eta)P_4^{(1)}, \\ (3\lambda + \mu_1 + \eta)P_1^{(1)} = 4\lambda P_0^{(1)}, \\ (2\lambda + 2\mu_1 + \eta)P_2^{(1)} = 3\lambda P_1^{(1)}, \\ (\lambda + 2\mu_1 + 2\mu_2 + \eta)P_3^{(1)} = 2\lambda P_2^{(1)}, \\ (2\mu_1 + 4\mu_2 + \eta)P_4^{(1)} = \lambda P_3^{(1)}. \end{cases} \quad (27)$$

При цьому.

$$\sum_{i=0}^4 P_i^{(1)} = 1.$$

Розв'язок системи рівнянь (27) визначається співвідношеннями:

$$\begin{aligned}
 P_1^{(1)} &= \frac{4\lambda}{3\lambda + \mu_1 + \eta} P_0^{(1)}; & P_3^{(1)} &= \frac{2\lambda P_2^{(1)}}{\lambda + 2\mu_1 + 2\mu_2 + \eta}; \\
 P_2^{(1)} &= \frac{3\lambda P_1^{(1)}}{2\lambda + 2\mu_1 + \eta}; & P_4^{(1)} &= \frac{\lambda P_3^{(1)}}{2\mu_1 + 4\mu_2 + \eta}; \\
 P_0^{(1)} &= \left(1 - \sum_{i=1}^4 P_i^{(1)}\right).
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

Умовна ймовірність того, що об'єкт не буде зруйнований під час ліквідації пожежі:

$$P_{об}^{(1)} = \int_0^{\infty} (\mu_1 + \mu_{ок}) e^{-(\mu_1 + \mu_{ок})t} \cdot e^{-\eta t} = \frac{\mu_1 + \mu_{ок}}{\mu_1 + \mu_{ок} + \eta}.
 \tag{29}$$

Ймовірність успішного гасіння пожежі:

$$P_{yc}^{(1)} = P_0^{(1)} \cdot P_{об}^{(1)}.
 \tag{30}$$

Дослідимо стохастичну мережу. Особливістю мережі, що розглядається, є те, що заявки (підрозділи) надходять у СМО мережі тільки один раз. При руйнуванні об'єкта мережа припиняє своє функціонування.

Ймовірності усіх можливих станів систем, які входять у мережу, у нашому прикладі будуть такі:

$$\text{СМО-0} : P_0^{(0)} = 0,009; P_1^{(0)} = 0,081; P_2^{(0)} = 0,27; P_3^{(0)} = 0,41; P_4^{(0)} = 0,23;$$

$$\text{СМО-1} : P_0^{(1)} = 0,3; P_1^{(1)} = 0,29; P_2^{(1)} = 0,23; P_3^{(1)} = 0,14; P_4^{(1)} = 0,048.$$

Тоді для ймовірностей можливих станів мережі маємо:

$$P_{M_0}\{4,0\} = \frac{1}{G} P_4^{(0)} \cdot P_0^{(1)} = \frac{1}{G} 0,069; \quad P_{M_1}\{3,1\} = \frac{1}{G} P_3^{(0)} \cdot P_1^{(1)} = \frac{1}{G} 0,119;$$

$$P_{M_2}\{2,2\} = \frac{1}{G} P_2^{(0)} \cdot P_2^{(1)} = \frac{1}{G} 0,0621; \quad P_{M_3}\{1,3\} = \frac{1}{G} P_1^{(0)} \cdot P_3^{(1)} = \frac{1}{G} 0,0113;$$

$$P_{M_4}\{0,4\} = \frac{1}{G} P_0^{(0)} \cdot P_4^{(1)} = \frac{1}{G} 0,00043,$$

де G – постійна, що забезпечує рівність суми ймовірностей одиниці.

Оскільки

$$P_{M_0} + P_{M_1} + P_{M_2} + P_{M_3} + P_{M_4} = 1,$$

то з урахуванням цього

$$P_{M_0}\{4,0\} = 0,263; P_{M_1}\{3,1\} = 0,454; P_{M_2}\{2,2\} = 0,237; P_{M_3}\{1,3\} = 0,043; P_{M_4}\{0,4\} = 0,0016.$$

Таким чином, ймовірність того, що на об'єкті будуть зосереджені 4 підрозділи, дорівнює 0,0016.

З урахуванням (30), ймовірність успішного гасіння пожежі буде:

$$P_{уг_4} = P_{M_4} \cdot P_0^{(1)} \cdot P_{об}^{(1)} = 0,0004.$$

Це свідчить про те, що гасіння пожежі при визначених вище умовах недоцільне.

Такий висновок дозволяє керівнику оперативної групи гасіння пожежі при прогнозуванні дій пожежних підрозділів зосередити основну увагу не на ліквідації безпосередньо пожежі, а на ліквідацію впливу наслідків руйнування об'єкта (рухомого складу) на навколишнє середовище.

Таким чином, показано, що для визначення успішності дії пожежних підрозділів щодо ліквідації пожежі на об'єкті (рухомому складі) залізничного транспорту, при умові, коли відомі тільки часові характеристики системи "пожежні підрозділи – об'єкт (рухомий склад), що потерпає від пожежі", можливе використання математичного апарата теорії масового обслуговування і, зокрема, математичних моделей на базі стохастичних мереж.

4. Висновки

В роботі запропоновано математичні моделі ймовірнісної оцінки дій пожежних підрозділів при ліквідації пожеж на залізничному транспорті, які дають можливість оцінити ефективність дій вищезазначених підрозділів.

Подальшими напрямками дослідження системи, що розглядається, є застосування моделі, яка пропонується, для дослідження мережі, до складу якої входять декілька СМО з різними характеристиками, а також моделей, що враховують втрати техніки та бойової обслуги.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Руководство по определению зон воздействия опасных факторов аварий со сжиженными газами, горючими жидкостями и аварийно химически опасными веществами на объектах железнодорожного транспорта. – М.: МПС, Гипротранстэн, 1997. – 124 с.
2. Методическое пособие по разработке планов тушения пожаров и расчета сил и средств на объекты подвижного состава железнодорожного транспорта. – М.: Гипротранстэн, 1999 – 138 с.
3. Правила безпеки та порядок ліквідації наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами при перевезенні їх залізничним транспортом. – К.: Мінтранс, 2001. – 885 с.
4. Наказ МВС України та Мінтрансу України від 05.08.96 р. № 536/252 “Про затвердження Інструкції про порядок здійснення державного пожежного нагляду на об’єктах залізничного транспорту і взаємодії ДПО і пожежних підрозділів відомчої воєнізованої охорони залізничного транспорту під час гасіння пожеж та ліквідації наслідків аварій”.
5. Клюсс П.П. та ін. Пожежна тактика. – Х. : Основа, 1998. – 592 с.
6. Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій. – К.: ДНАО 0.00-4.33-99, Держнаглядохоронпраці України, 1999. – 94 с.
7. Інструкція про порядок дій працівників залізничного транспорту при виявленні та гасінні пожеж у рухомому складі залізничного транспорту. ЦУО-0022, Укрзалізниця. – К., 2000. – 15 с.
8. Інструкція з організації відбудовних робіт при ліквідації наслідків транспортних подій на залізницях України. – К.: Укрзалізниця, 2001. – 32 с.
9. *Иванников В.П., Клюсс П.П.* Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат. – 1987. – 288 с.
10. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. – М.: Сов.радио, 1972. – 552 с.
11. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Прикладные задачи теории вероятностей. – М.: Радио и связь, 1983. – 416 с.
12. *Новиков О.А., Петухов С.И.* Прикладные вопросы теории массового обслуживания. – М.: Сов.радио, 1969. – 352 с.
13. *Шуенкин В.А., Донченко В.С.* Прикладные модели теории массового обслуживания. – К.: НМК ВО, 1992. – 398 с.
14. *Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н.* Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука. Гл.редакция физ.-мат.лит. – 1987. – 336 с.
15. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и её инженерные приложения. – М.: Наука, 1991. Гл.ред. физ.-мат. литературы. – 1991. – 384 с.
16. Типове положення про Систему управління безпекою на транспорті. Наказ Мінтрансу України від 11.03.03 № 185. – К.: Мінтранс України, 2003. – 63 с.
17. *Лукин А.И.* Системы массового обслуживания: Анализ систем массового обслуживания с отказами в военной практике. – М.: Воениздат, 1980. – 189 с.
18. *Клейнрок Л.* Вычислительные системы с очередями / Под ред. Б.С. Цыбакова. – М.: Мир, 1979. – 432 с.
19. Основы теории вычислительных систем / С.А. Майоров и др; Под ред. С.А. Майорова. – М.: ВШ, 1978. – 408 с.
20. Информационные технологии на железнодорожном транспорте / Под ред. Э.К. Лецкого, Э.С. Поддавашкина, В.В. Яковлева. – М.: УМК МПС России, 2001. – 668 с.

КАЦМАН Михайло Давидович – інженер, начальник відділу бойової спеціальної підготовки воєнізованої охорони Південно-Західної залізниці.

Наукові інтереси:

– дослідження операцій, системи прийняття рішень.

ЮХИМЧУК Сергій Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтелектуальних систем Вінницького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– теорія автоматичного керування, математичне моделювання.

Подано 03.11.2003