

УДК 62-843.6

А.В. Гончаренко, к.т.н.

ПОКАЗНИКИ БЕЗПЕКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ В УМОВАХ ЗРОСТАННЯ ЦІН НА ПАЛЬНЕ

Розглянуто математичне сподівання витрат транспортної системи за певний проміжок часу як показник її безпечного функціонування в умовах зростання цін на паливо. Враховано вплив раптових збитків унаслідок катастрофічних подій. Отримано результати прикладного характеру дослідження. Побудовано відповідні графіки.

Expectation of a transport system operational costs, for a determined time interval, as an index of its safety functioning, in conditions of fuel prices growth, is considered. Attention is paid to the influence of unexpected losses due to crash events. Achieved results of applicable researches. Plotted appropriate diagrams.

Актуальність задачі

У процесі здійснення виробничої діяльності транспортна компанія (ТК) перебуває під впливом безлічі факторів. Їх сукупна дія конкретизує реальний стан, в якому вона опиняється. Будь-яке підприємство, зокрема й ТК, дотримуючись вимог законодавства, прагне мати якнайбільший прибуток.

Аналізуючи результати своєї діяльності, підприємство приділяє увагу доходам та витратам. Серед витрат важливим є врахування можливих збитків, що їх зазнає ТК унаслідок несподіваних подій катастрофічного характеру. Такі збитки можуть бути дуже відчутними, тому потрібно вживати заходів, які запобігають виникненню катастроф.

Отже, процес керування функціонуванням транспортної системи передбачає наявність важелів, котрі потребують показників надійності та безпеки. Доцільно, щоб ці показники мали вартісне вираження, оскільки на проведення запобіжних заходів з попередження катастроф потребують значних витрат коштів.

З-поміж витрат ТК важлива роль належить цінам на паливо. Тому комплексний розгляд безпечного функціонування з урахуванням збитків від можливих катастроф, вартості запобіжних заходів за умови зростання цін на паливо є актуальним завданням.

Аналіз стану проблеми

У роботі [1] розглянуто принципи системи пошуку оптимального режиму роботи суднового гідромеханічного комплексу. Забезпечення ресурсу та якості технічної експлуатації дизеля проводиться з урахуванням надійності сучасних середньооборотних дизелів. Ефективність експлуатації дизеля у разі оптимізації керування режимами навантаження пов'язана з імовірністю безвідмовної роботи.

У роботах [2–8] розкривається зв'язок між витратами на підтримання надійності, безпеки та ризиком збитків унаслідок виникнення катастроф.

У роботі [2] аналіз ризику виконується з урахуванням наслідків несприятливих подій – збитків, спричинених втратами обладнання та людськими жертвами, очікуваної частоти їх появи, розглянуто прийоми аналізу ризику (аналіз видів відмов та наслідків, аналіз критичності, вивчення небезпек та працездатності, аналіз причин-наслідків, оптимальний розподіл коштів, призначених для зменшення ризику), здійснено огляд та порівняння методів аналізу ризику. Моделювання процесів та циклів відмов, ремонтів, напрацювань на відмову та інших характеристик роботи систем виконано у різних постановках, для широкого спектра відмов, а також кола питань, що потребують вирішення під час проектування та експлуатації складних технічних систем, якими є устаткування, агрегати, комплекси тощо.

У роботі [3] йдеться про те, що фрагментарний розгляд співвідношення проблем «безпека-вартість-ефективність» показує, що в цій тріаді, щоб задовольнити деякі елементарні вимоги, рівень безпеки польотів повинен мати визначений оптимум, котрий відрізняється від нульового рівня ризику.

Найбільш ймовірні зміни витрат на забезпечення безпеки та розмірів збитку від появи можливих пригод залежно від варіації деякого параметра, пропорційного ймовірності їх невиникнення, теоретично розглянуто в роботі [4].

У роботі [5] проведено економічне оцінювання заходів з підвищення безпеки польотів (БП). Також проаналізовано структуру разових можливих втрат унаслідок катастрофи, наведено принципові положення щодо моделювання у забезпеченні безпеки.

У роботах [6; 7] розглянуто проблеми оптимізації процесів технічного обслуговування з урахуванням показників надійності та вартості.

Критерії безпеки проводилися для незмінних у часі витрат на підтримання надійності, запобіжні заходи щодо катастроф досліджувались у дисертації [8].

Отже, доцільно спробувати об'єднати фрагменти попередніх досліджень у такий спосіб, щоби їх комбінація узагальнила комплексний, науково обґрунтований підхід до цієї актуальної проблеми.

Постановка завдання

Припустимо, що транспортне судно, здійснюючи функцію перевезення вантажів та пасажирів споживає паливо, ціна якого постійно зростає у часі.

Швидкість витрат коштів визначають за формулою

$$V_r(t) = V_{r0} + a_r t, \quad (1)$$

за структурою

$$V_r(t) = V_c(t) + s, \quad (2)$$

де

V_{r0} – початкова швидкість витрат коштів;

a_r – коефіцієнт пропорційності;

t – час;

$V_c(t)$ – швидкість витрат коштів, які містять змінні у часі витрати на паливо останні витрати вважаємо постійними у часі;

s – швидкість відрахувань коштів, які цілеспрямовано витрачаються на запобіжні заходи з підтримання надійності та безпеки (їх вважаємо постійними у часі).

Оскільки у такій постановці змінні в часі лише витрати на паливо, то

$$V_c(t) = V_{c0} + a_r t, \quad (3)$$

де

V_{c0} – початковий рівень швидкості витрат коштів, окрім s .

Тоді

$$V_{r0} = V_{c0} + s. \quad (4)$$

Витрати V_{c0} містять у собі початковий рівень витрат на паливо.

Проведемо оцінювання характеристик функціонування системи ТК в умовах, які допускають виникнення техногенних катастроф. Розглянемо математичне сподівання витрат за розрахунковий період.

Передбачається, що вплив витрат на безпеку можна врахувати через зміну інтенсивності подій λ , що є функцією витрат s . Такій залежності за необхідних умов відповідає модель

$$\lambda(s) = \lambda_1 + \Delta\lambda e^{-ks}, \quad (5)$$

де λ_1 – мінімально досяжна за певного рівня розвитку техніки частота катастрофічних подій, котра не може бути зменшена через подальше нарощування витрат з підтримання надійності та безпеки;

$\Delta\lambda$ – діапазон можливої зміни $\lambda(s)$ від початкового значення $\lambda_0 = \lambda(s=0)$ до λ_1 ;

k – коефіцієнт ефективності використання коштів, які вкладаються у надійність та безпеку.

Для значень

$$\lambda_1 = 1 \cdot 10^{-5}, \quad \lambda_0 = 1 \cdot 10^{-4}, \quad k = 0,05$$

графік залежності $\lambda(s)$ зображено на рис. 1.

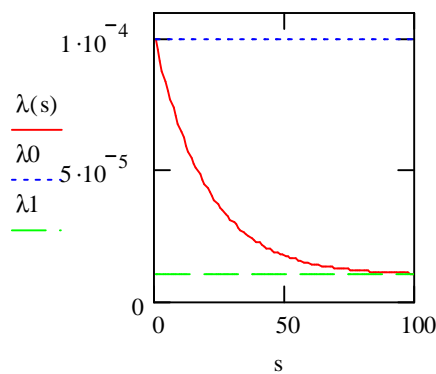


Рис. 1. Графік залежності $\lambda(s)$

Модель оцінювання впливу витрат, вкладених у підтримання надійності та рівня безпеки на ймовірність подій, пов'язаних з великими втратами, істотним порушенням економічних характеристик протікання функціонування ТК, будується в припущенні пуассонівського потоку несприятливих подій.

Цей потік для потрібної постановки задачі є найпростішим або стаціонарним пуассонівським, оскільки він відповідає таким умовам:

- 1) стаціонарності – інтенсивність подій $\lambda(s)$ не залежить від часу;
 - 2) відсутності післядії – вважаємо події незалежними, кількість подій для будь-яких часових інтервалів, що не перетинаються, не залежить від кількості подій, які відбулися в інших інтервалах часу, що є найбільш суттєвою умовою для найпростішого потоку;
 - 3) ординарності – вірогідність того, що на елементарній ділянці часу Δt станеться дві або більше подій, є нехтувано малою порівняно з ймовірністю того, що відбудеться одна подія.
- Названі умови є лише початковим наближенням до реальності, до того ж події, що утворюють катастрофічний потік, можна вважати однорідними для грубої постановки задачі.

Катастрофи є подіями, що відбуваються досить рідко, тому вважати процес експлуатації засобів транспортування як серію експериментів з великою кількістю повторень та малою ймовірністю виникнення катастрофи цілком виправдано.

Випадкова величина – це кількість подій за певний період часу, розподілена за законом Пуассона [9]. Імовірність, що за час τ відбудеться m подій, за умови стаціонарності дорівнює

$$P_m(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^m}{m!} e^{-\lambda\tau}, \quad (6)$$

де

$\lambda\tau$ – математичне сподівання кількості подій за час.

Як відомо з робіт [8–12],

$$P_0(\tau) = e^{-\lambda\tau},$$

звідки

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Знайдемо щільність розподілу

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (7)$$

Моделювання здійснюється для проміжку часу $[0, t_k]$, який може визначати замовник. У найпростішому випадку припускаємо, що за час $[0, t_k]$ може статися тільки одна катастрофа.

Під час роботи транспортного судна витрати ТК, пов'язані із виробництвом транспортної продукції, можна подати у вигляді

$$R = R' + \Delta r', \quad (8)$$

де R' – витрати ТК, пов'язані з експлуатацією судна;

$\Delta r'$ – разові втрати, що несе ТК у результаті катастрофи.

У свою чергу, сума R' має двоякий характер і розпадається на систему:

$$R' = \left\{ \begin{array}{l} \int_0^{t^*} V_r(t) \cdot dt; \quad t^* \leq t_k \\ \int_0^{t_k} V_r(t) \cdot dt; \quad t^* > t_k \end{array} \right\}, \quad (9)$$

де

t^* – час між подіями.

Випадкова величина має щільність розподілу (7).

Значення разових втрат залежить від t^* :

$$\Delta r' = \left\{ \begin{array}{l} \Delta r; \quad t^* \leq t_k \\ 0; \quad t^* > t_k \end{array} \right\}. \quad (10)$$

Математичне сподівання сумарних витрат ТК [9], з урахуванням залежності (8):

$$E(R) = \int_0^{\infty} R(t^*) f(t^*) dt^* = \int_0^{\infty} [R'(t^*) + \Delta r'] f(t^*) dt^*. \quad (11)$$

Розв'язання задачі

Для прикладу розглянемо вираз математичного сподівання (11) докладніше.

Ураховуючи вирази (9), (10), отримаємо

$$E(R) = \int_0^{t_k} \left[\int_0^{t^*} V_r(t) dt \right] + \Delta r \left] f(t^*) dt^* + \int_{t_k}^{\infty} \left[\int_0^{t_k} V_r(t) dt \right] f(t^*) dt^*.$$

Ураховуючи рівняння (1), отримаємо

$$E(R) = \int_0^{t_k} \left[\int_0^{t^*} (V_{r0} + a_r t) dt \right] + \Delta r \left] f(t^*) dt^* + \int_{t_k}^{\infty} \left[\int_0^{t_k} (V_{r0} + a_r t) dt \right] f(t^*) dt^*.$$

Для зручності інтегрування виділимо

$$A = \int_0^{t_k} \left[\int_0^{t^*} (V_{r0} + a_r t) dt \right] + \Delta r \left] f(t^*) dt^*, \quad (12)$$

$$B = \int_{t_k}^{\infty} \left[\int_0^{t_k} (V_{r0} + a_r t) dt \right] f(t^*) dt^*. \quad (13)$$

Використовуючи щільність розподілу (7), маємо

$$A = \int_0^{t_k} \left[\int_0^{t^*} (V_{r0} + a_r t) dt \right] + \Delta r \left] \lambda e^{-\lambda t^*} dt^*.$$

Тоді

$$A = \int_0^{t_k} \left(V_{r0} t^* + \frac{a_r}{2} (t^*)^2 + \Delta r \right) \lambda e^{-\lambda t^*} dt^*.$$

Остаточно отримаємо

$$A = -V_{r0} t_k e^{-\lambda t_k} + \frac{V_{r0}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_k}) - \frac{a_r}{2} (t_k)^2 e^{-\lambda t_k} - \frac{a_r}{\lambda} t_k e^{-\lambda t_k} - \frac{a_r}{\lambda^2} (e^{-\lambda t_k} - 1) + \Delta r (1 - e^{-\lambda t_k}).$$

Аналогічно отримуємо

$$B = \int_{t_k}^{\infty} \left[\int_0^{t_k} (V_{r0} + a_r t) dt \right] \lambda e^{-\lambda t^*} dt^*.$$

Після першого інтегрування

$$B = \int_{t_k}^{\infty} \left(V_{r0} t_k + \frac{a_r}{2} (t_k)^2 \right) \lambda e^{-\lambda t^*} dt^*.$$

У цьому випадку

$$B = V_{r0} t_k e^{-\lambda t_k} + \frac{a_r}{2} (t_k)^2 e^{-\lambda t_k}.$$

Тоді, склавши A та B рівнянь (12) і (13), після спрощення маємо вираз для математичного сподівання сумарних витрат за розрахунковий період:

$$E(R) = \left(\frac{V_{r0}}{\lambda} + \Delta r + \frac{a_r}{\lambda^2} \right) (1 - e^{-\lambda t_k}) - \frac{a_r}{\lambda} t_k e^{-\lambda t_k}. \quad (14)$$

Практичне застосування розв’язку задачі

Проведемо дослідження показника безпеки функціонування транспортної системи (14) в умовах зростання цін на паливо при постійних у часі витратах на забезпечення надійності та безпеки, тобто у разі виконання умов постановки задачі (1)–(4). У роботі [8] отримано вираз математичного сподівання витрат ТК за період $[0, t_k]$ у вигляді

$$E(R) = \left(\frac{C + V_s}{\lambda_{\min} + \frac{\lambda_0 - \lambda_{\min}}{1 + \alpha V_s}} + \Delta r \right) \left(1 - e^{-\left(\lambda_{\min} + \frac{\lambda_0 - \lambda_{\min}}{1 + \alpha V_s} \right) t_k} \right), \quad (15)$$

де

C – постійна величина, яка являє собою суму швидкостей витрат ресурсів авіаційної ТК, загальних коштів, сплачуваних за відповідними ставками статей оподаткування V_t , та витрат пов’язаних з безпосередньою експлуатацією літака, амортизаційними відрахуваннями V_e ;

V_s – керуюча змінна, незалежна змінна, інтенсивність підтримання БП, швидкість цілеспрямованих витрат коштів, пов’язаних з підтриманням заданого рівня БП;

λ_{\min} – мінімально досяжна за певного рівня розвитку техніки частота катастрофічних подій, котра не може бути зменшена через подальше нарощування витрат з підтримання БП;

λ_0 – інтенсивність катастрофічних подій без проведення цілеспрямованих заходів з підтримання БП;

α – ефективність використання ресурсів з підтримання БП.

Передбачається, що витрати, пов’язані із регламентними заходами із забезпечення експлуатації, не входять у V_s , тому $\lambda_0 \neq \infty$.

Подібно до критерію безпеки (15) у формулі (14) застосуємо рівняння (4) і (5) та отримуємо

$$E(R) = \left(\frac{V_{c0} + s}{\lambda 1 + \Delta \lambda e^{-k \cdot s}} + \Delta r + \frac{a_r}{(\lambda 1 + \Delta \lambda e^{-k \cdot s})^2} \right) \times \left(1 - e^{-(\lambda 1 + \Delta \lambda e^{-k \cdot s}) t_k} \right) - \frac{a_r}{\lambda 1 + \Delta \lambda e^{-k \cdot s}} t_k e^{-(\lambda 1 + \Delta \lambda e^{-k \cdot s}) t_k}. \quad (16)$$

Отже, відповідно до виразу (16), маємо математичне сподівання витрат ТК за розрахунковий період як функцію від витрат на підтримання надійності та безпеки, тобто

$$E(R) = E(s).$$

Фізичний сенс параметра a_r полягає у зростанні цін на паливо.

Дослідження критерію (16) показують зміну математичного сподівання витрат зі зміною a_r .

Для значень

$$V_{c0} = 5, \quad \lambda 1 = 1 \cdot 10^{-5}, \quad \lambda 0 = 1 \cdot 10^{-4}, \quad k = 0,05, \\ \Delta r = 1 \cdot 10^6, \quad a_r = 0, 0,1, 0,2, \dots, 0,9, \quad t_k = 100$$

графіки математичних сподівань витрат $E0(s), E1(s), \dots, E9(s)$ відповідно показано на рис. 2. Також на рис. 2 зображено залежності (12) і (13) відповідно $A(s)$ і $B(s)$ та суму $C(s)$. Графік суми $C(s)$ збігається із графіком $E9(s)$, що свідчить про вірність інтегрування.

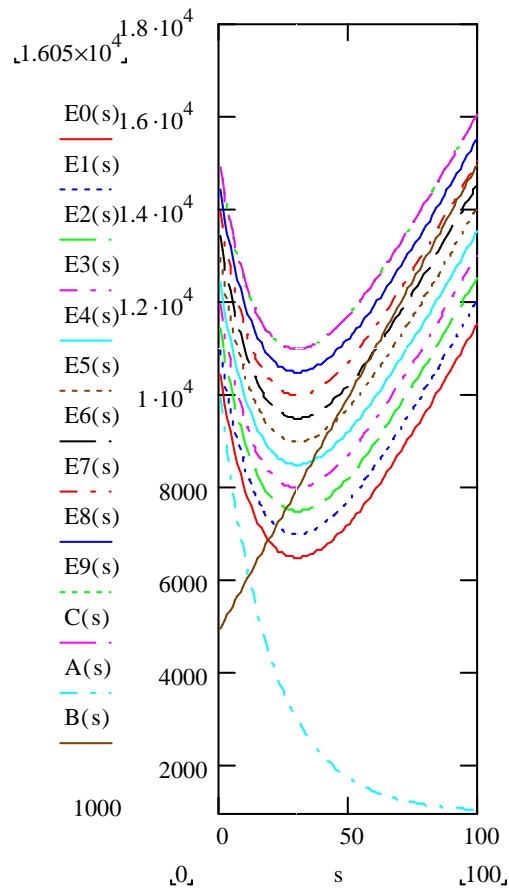


Рис. 2. Графіки залежності $E(s)$

Висновки

На підставі викладеного з'ясовано вплив зростання цін на паливо на комплексний показник надійного та безпечного функціонування ТК.

З аналізу поведінки критерію (16) виявлено наявність оптимуму витрат на підтримання надійності та безпечної експлуатації транспортного судна. У тому випадку, коли зростання вартості палива в часі має лінійний характер (1), за умови незмінних інших видів витрат, умови постановки задачі (2)–(4) з'ясовано, що оптимальні витрати коштів на надійність являють собою сталу величину. Для порівняння зазначимо, що у роботі [8] було досліджено вплив визначального параметра "разових" втрат, обумовлених катастрофою і ліквідацією її наслідків на критерій (15) Δr , $E(R)$ керування змінна, математичне сподівання сумарних втрат R за період експлуатації судна протягом часу $[0, t_k]$, що показало нелінійний характер залежності оптимальних значень відповідно до значення можливих раптових разових втрат.

У подальших дослідженнях слід оцінити вплив зростання цін не лише на паливо, а й на інші види витрат. Така постановка задачі передбачала умову стаціонарності (5), за якої ймовірнісні характеристики потоку несприятливих подій виразу (6) мають постійну щільність потоку (5). З зазначеного припущення випливає щільність розподілу (7). Будь-який фізичний процес, який називаємо «стаціонарним», насправді є стаціонарним лише протягом обмеженого інтервалу часу, а продовження цього інтервалу часу на період $[0, t_k]$ – це лише зручний прийом, застосований з метою спрощення аналізу [8–11]. Доцільно простежити вплив нестаціонарності, зміну умов (5)–(7), а також варіант $s(t)$, тому що підтримання надійної експлуатації судна навряд чи потребує постійних витрат коштів.

Зокрема, вартість технічного обслуговування та ремонту теж не є сталою у часі.

Модельна залежність (5) зазначених припущень є одним із можливих варіантів адекватного оцінювання перебігу реальних процесів підтримання надійного технічного стану транспортного судна. Модель (5) критерію (16) аналогічна відповідній залежності $\lambda(V_s)$ виразу (15), яка була статистично обґрунтована у роботі [12].

Дослідницькі задачі прикладного характеру можна розв'язувати, застосовувавши ідентифікацію отриманих за даними випробувань, експериментів, спостережень та експлуатації суден параметрів критерію безпеки (16). Принципово можливо використання статистичних оцінок.

Таким чином, у цій роботі досягнуто основної мети, теоретично викладено науково обґрунтований варіант показника безпеки функціонування транспортної системи в умовах зростання цін на паливо, проведено аналіз перспективних напрямів досліджень. Практичний доробок роботи – це розв'язання поставленої задачі, модельні розрахунки в числових еквівалентах, побудовані графіки, аналіз отриманих результатів.

Література

1. *Суворов П.С.* Управление режимами работы главных судовых дизелей. – Одесса: ЛАТСТАР, 2000. – 238 с.
2. *Хенли Э. Дж., Кумамото Х.* Надежность технических систем и оценка риска / пер. с англ. В.С. Сыромятникова, Г.С. Деминой; под общ. ред. В.С. Сыромятникова. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
3. *Жулев В.И., Иванов В.С.* Безопасность полетов летательных аппаратов: Теория и анализ. – М.: Транспорт, 1986. – 224 с.
4. *Белов П.Г.* Теоретические основы системной инженерии безопасности. – К.: КМУГА, 1997. – 426 с.
5. *Касьянов В.А., Давиденко М.Ф., Демьянчук В.С., Коба В.Г.* Экономическая оценка мероприятий по повышению уровня безопасности полетов // Моделирование в обеспечении безопасности полетов: сб. науч. тр. – К.: КИИГА, 1987. – С. 10.
6. *Игнатов В.А., Маньшин Г.Г., Костановский В.В.* Элементы теории оптимального обслуживания технических изделий. – Минск: Наука и техника, 1974. – 192 с.
7. *Барзилович Е.Ю.* Оптимально управляемые случайные процессы и их приложения (теоретические основы эксплуатации авиационных систем по состоянию). – Егорьевск: Академия транспорта РФ; ЕАТК ГА, 1996. – 299 с.
8. *Гончаренко А.В.* Керування підтриманням безпеки польотів через технічні та витратні чинники: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.03. – К., 2005. – 198 с.
9. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 2000. – 458 с.
10. *Барлоу Р., Прошан Ф.* Математическая теория надежности / пер с англ.; под. ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Сов. радио, 1969. – 288 с.
11. *Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.* Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 364 с.
12. *Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н.* Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука, 1966. – 258 с.