

УДК 62-843.6

А.В. Гончаренко, к.т.н.

## ВАРІАНТИ ВИБОРУ СТРАТЕГІЇ ПІДТРИМАННЯ БЕЗПЕКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ

*Розглянуто варіанти вибору стратегії підтримання безпеки функціонування транспортної системи. Виконано математичне моделювання за критеріями обмеження показників надійності, ефективності та вартості стримувальних заходів.*

*Variants of a strategy choosing for a transport system functioning safety support is considered. Mathematical modelling by restriction indexes criteria of reliability, efficiency, and prevention measures costs is conducted. Attention is paid to the influence of unexpected losses due to crash events. Achieved results of applicable researches. Plotted appropriate diagrams.*

**адаптивізація, безпечна експлуатація, концепція, оптимізація, критерії ефективності, придатність, транспортна система**

### Вступ

Результати роботи транспортної компанії (ТК) аналізують за багатьма показниками, серед яких чи не найголовніші економічні зокрема, прибуток оцінюють як різницю між доходами та витратами. Надійність технічних засобів може суттєво вплинути на розміри витрат ТК за відповідний період експлуатації.

Підтримання техніки у працездатному стані потребує періодичних заходів технічного обслуговування (профілактичних замінів, діагностики), вартість проведення яких інколи може бути великою. З обсягом та інтенсивністю їх проведення, а також оцінкою ефективності результатів зазначених заходів, керівництво ТК погоджується зважаючи на суб'єктивні переваги при прийнятті рішень щодо політики техніко-економічної поведінки.

Таким чином, вибір варіанта техніко-економічної стратегії підтримання безпеки функціонування ТК з багатьох можливих – актуальне завдання.

### Аналіз стану проблем

У праці [1] викладено методологічні основи дослідження ефективності операцій у техніці, наведено основні показники і критерії ефективності, правила їх вибору, принципи та методи імітаційного моделювання при дослідженні ефективності технічних систем, розглянуто питання опрацювання рішень на підставі аналізу ефективності операцій, методи обґрунтування рішень при дослідженні ефективності складних технічних систем, проілюстровано схему вибору стратегії за значеннями функції розподілу реального результату операції із застосуванням критерію максимальної ймовірності потрібного результату

та із застосуванням критерію найбільшого гарантованого результату, зображено модель проблемної ситуації, структурну схему  $S_o$ -системи, схему узагальненої операції, схему методу затрати-ефект.

У працях [2–4], де загально сформульовано поняття проблемної ситуації у рамках проблемно-ресурсного підходу, досить велику увагу приділено суб'єктивним перевагам з урахуванням можливих ризиків, тобто, враховується психологічне ставлення суб'єкта до отриманої інформації, ентропія щодо прийняття рішень в умовах ризиків.

У праці [5] запропоновано моделі залежностей інтенсивностей потоків відмов, несприятливих та катастрофічних подій від інтенсивності керування безпекою транспортного судна, вираженої через величини швидкості відрахувань коштів на проведення заходів з підтримання безпеки.

Таким чином, доцільно розглянути варіанти вибору стратегії підтримання безпеки функціонування ТК, враховуючи суб'єктивну складову.

**Мета** роботи – розглянути, як в результаті функціонування ТК транспортне судно, що відповідно до прийнятих стратегій підтримання безпеки здійснює перевезення вантажів та пасажирів, утворює прибуток. Слід врахувати, що частина витрат ТК спрямовується на підтримання безпеки через утримання інтенсивності потоку відмов у прийнятних межах. Варто простежити за допомогою варіантів складених критеріїв, вплив прийнятих стратегій на показники ТК.

### Постановка задачі

Відповідно до роботи [1] операція, як процес функціонування  $S_o$ -системи, описується набором певних параметрів. Сукупність конкретних значень цих параметрів у фіксований момент часу називають станом системи.

Стан  $S_0$ -системи та навколишнього середовища у певний момент часу називають ситуацією або обстановкою операції.

Результат операції  $Y$  залежить від стратегії  $u$ : через основні результуючі фактори – корисний ефект  $q$ , затрачені ресурси  $C$  та час  $T$ :

$$Y(u) = Y(q(u), C(u), T(u)).$$

Показник ефективності  $W$  „об’єктивний” – математичне сподівання (МС) функції відповідності:

$$W(u) = M[\rho(Y(u), Y^{TP})].$$

Для того щоб числова функція  $W$ , визначена на множині стратегій  $U$ , могла розглядатися як показник ефективності, окрім вимоги відповідності цілі  $A_0$  операції вона повинна враховувати відповідність системі переваг особи, що приймає рішення (ОПР).

Показник ефективності  $W$  „суб’єктивний” – МС оцінної функції:

$$W(u) = M[f^{\Theta_c}(\rho(Y(u), Y^{TP}))],$$

де

$f^{\Theta_c}(\rho)$  – спеціальна оцінна функція, введена для формального урахування психологічних особливостей ОПР;

$\Theta_c$  – інформація;

$\rho(Y(u), Y^{TP})$  – числова функція формально введена на множині результатів операції для опису відповідності реального результату  $Y$  операції потрібному;

$Y^{TP}$  – потрібний результат.

Функція  $f^{\Theta_c}(\rho)$  відображає ставлення ОПР до ризику.

Залежно від вигляду оцінної функції  $f^{\Theta_c}(\cdot)$  та функції відповідності  $\rho(Y(u), Y^{TP})$  можна отримати різні показники ефективності.

Критерій ефективності  $K$  – правило, що дозволяє зіставляти стратегії, які характеризуються різним ступенем досягнення мети, та здійснювати спрямований вибір стратегій із множини допустимих.

Критерій ефективності вводиться на основі певної концепції раціональної поведінки. Є три концепції раціональної поведінки систем (опрацювання рішень):

- придатність;
- оптимізація;
- адаптивізація.

Припустімо, що відповідно до прийнятих стратегій підтримання безпеки функціонування ТК транспортне судно здійснює перевезення вантажів та пасажирів. У результаті цієї діяльності утворюється прибуток, що є метою експлуатації. Частина витрат ТК спрямовується на підтримання безпеки через утримання інтенсивності потоку відмов у прийнятних межах. Якщо існує декілька стратегій  $U$  техніко-економічної поведінки:  $(A, B, C, \dots)$ , котрим відповідають моделі інтенсивностей потоків відмов:

$$\lambda = \lambda_A(V_s), \quad (1)$$

$$\lambda = \lambda_B(V_s), \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda_C(V_s), \quad (3)$$

.....

де  $\lambda$  – інтенсивність потоку відмов;

$\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C, \dots$  – інтенсивності потоку відмов, які змінюються залежно від прийнятої стратегії;

$V_s$  – частина витрат ТК, яка спрямовується на підтримання безпеки через утримання інтенсивності потоку відмов у прийнятних межах; то має бути критерій  $K$  як засіб для вирішення питання про прийняття тієї чи іншої стратегії, виходячи з ознак цільового параметра  $A_0$ .

Метою діяльності будь-якого комерційного підприємства, в т. ч. й ТК є прибуток, що отримується на фоні безаварійної роботи засобів транспорту.

Особливо вплив надійності техніки на безпеку та ефективність відчутний, коли враховується відмінний від нульового рівень ризику виникнення катастроф, тому має сенс застосувати як показник для зіставлення при критерії  $K$  МС витрат ТК за певний період часу  $E$  з урахуванням можливих збитків  $\Delta r$ .

Тоді МС сумарних витрат ТК:

$$E(R) = \int_0^{\infty} R(t^*) f(t^*) dt^*, \quad (4)$$

де

$R(t^*)$  – сумарні витрати ТК, як функція від випадкової величини  $t^*$ ;

$t^*$  – час моменту катастрофи;

$f(t^*)$  – щільність розподілу випадкової величини  $t^*$ .

Щільність розподілу  $f(t^*)$  залежатиме від інтенсивності потоку відмов  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C, \dots$

Вирази (1)–(3) й МС будуть відповідати обраній стратегії  $E_A(R)$ ,  $E_B(R)$ ,  $E_C(R)$ , ...

Критерії  $K_i$  дають змогу порівняти показники МС сумарних витрат ТК, або накласти обмеження на показники надійності, ефективності або вартості стримувальних заходів. Тим самим стає можливим свідомо обрати варіант стратегії підтримання безпеки функціонування ТК.

Для випадку, коли розглядається функціонування активної системи, пов'язане з можливістю виникнення катастрофічних подій, які ставлять під сумнів існування усієї системи або досить серйозно погіршують її стан, система змушена здійснювати витрати на забезпечення певного рівня безпеки. Якщо стратегії орієнтовані на максимізацію швидкості зростання корисності, то «егалітарна» позиційна функція колективної корисності

$$V_e = \frac{dW_e}{dt};$$

$$\sigma_{opt} = \text{Sup}_{\sigma \in S_a} \frac{dW_e}{dt} = \text{Sup}_{\sigma \in S_a} \left( \frac{du_{\min}}{dt} \right),$$

де

$W_e$  – критерій оптимальності;

$t$  – час;

$\sigma$  – альтернатива;

$S_a$  – множина альтернатив;

$u$  – індивідуальні корисності.

За умов, що усі останні корисності не зменшуються:

$$\frac{du_k}{dt} \geq 0 \quad (k \in \overline{2, M}).$$

### Розв'язання задачі

Розглянемо відповідно до трьох стратегій  $A, B, C$  три моделі інтенсивності потоку відмов  $\lambda$ , які, аналогічно до залежностей (1)–(3), є функціями витрат  $s$ :

$$\text{Модель 1: } \lambda d(s) = \lambda 1 + \frac{\Delta \lambda}{1 + \alpha s}, \quad (5)$$

де

$\lambda 1$  – мінімально досяжна за певного рівня розвитку техніки частота катастрофічних подій, яку не можна зменшити через подальше нарощування витрат з підтримання надійності та безпеки  $s$ ;

$\Delta \lambda$  – діапазон можливої зміни  $\lambda(s)$  від початкового значення  $\lambda 0 = \lambda(s=0)$  до  $\lambda 1$ ;

$\alpha$  – коефіцієнт ефективності використання коштів, що вкладаються у надійність та безпеку.

$$\text{Модель 2: } \lambda e(s) = \lambda 1 + \Delta \lambda \cdot e^{-k \cdot s}, \quad (6)$$

де

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

$$\text{Модель 3: } \lambda l(s) = \lambda 0 - \frac{\Delta \lambda}{s_{\max}} s, \quad (7)$$

де

$s_{\max}$  – максимальна інтенсивність підтримання надійності.

Для значень  $\lambda 1 = 1 \cdot 10^{-5}$ ,  $\lambda 0 = 1 \cdot 10^{-4}$ ,  $\alpha = 0,15$ ,  $k = 0,05$ ,  $s_{\max} = 1 \cdot 10^2$  графіки залежностей  $\lambda(s)$  показано на рис. 1.

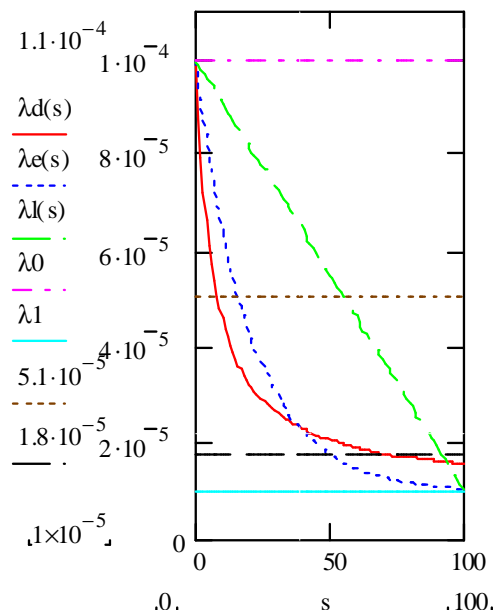


Рис. 1. Графіки залежностей  $\lambda(s)$

Модель оцінювання впливу витрат на підтримання надійності та рівня безпеки на ймовірність подій, зумовлених великими втратами, істотними порушеннями економічних характеристик функціонування ТК, будується в припущенні стаціонарного пуассонівського потоку несприятливих подій.

У такому разі у формулі (4) щільність розподілу випадкової величини  $t^*$  становить:

$$f(t^*) = \lambda \cdot e^{-\lambda t^*}. \quad (8)$$

Моделювання виконуємо для проміжку часу  $[0, t_k]$ , що може визначатися замовником. У найпростішому випадку припускаємо, що за час  $[0, t_k]$  може статися тільки одна катастрофа.

Витрати ТК, пов'язані із виробництвом транспортної продукції, можна подати у вигляді

$$R = R' + \Delta r' = R(t^*), \quad (9)$$

де

$R'$  – витрати ТК, пов'язані із експлуатацією судна;

$\Delta r'$  – разові втрати, яких зазнає ТК в результаті катастрофи.

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

$$R' = \begin{cases} V_r \cdot t^*; & t^* \leq t_k \\ V_r \cdot t_k; & t^* > t_k \end{cases}, \quad (10)$$

де

$V_r$  – швидкість витрат коштів, яку відповідно до постановки задачі, вважатимемо величиною, незмінною у часі;

$t^*$  – час між подіями, випадкова величина, що має щільність розподілу (8).

Величина разових втрат залежить від  $t^*$  у такий спосіб:

$$\Delta r' = \begin{cases} \Delta r; & t^* \leq t_k \\ 0; & t^* > t_k \end{cases}. \quad (11)$$

Математичне сподівання сумарних витрат ТК, з урахуванням залежності (9)

$$E(R) = \int_0^{\infty} [R'(t^*) + \Delta r'] \cdot f(t^*) \cdot dt^*. \quad (12)$$

Тоді виходячи з показників (4), (12), для залежностей (5)–(7), враховуючи вирази (8), (10), (11), після інтегрування та перетворень, отримуємо формули МС витрат ТК за певний період експлуатації відповідно до прийнятих стратегій як функції від інтенсивності керування надійністю  $s$  у вигляді:

$$Ed(s) = \left( \frac{V_r(s)}{\lambda d(s)} + \Delta r \right) [1 - \exp(-\lambda d(s)t_k)]; \quad (13)$$

$$Ee(s) = \left( \frac{V_r(s)}{\lambda e(s)} + \Delta r \right) [1 - \exp(-\lambda e(s)t_k)]; \quad (14)$$

$$El(s) = \left( \frac{V_r(s)}{\lambda l(s)} + \Delta r \right) [1 - \exp(-\lambda l(s)t_k)], \quad (15)$$

де  $V_r(s) = V_c + s$ ;  $V_c$  – постійна величина, яка являє собою суму швидкостей витрат ресурсів ТК, загальних коштів, сплачуваних за відповідними

ставками статей оподаткування та витрат, пов'язаних з безпосередньою експлуатацією транспортного судна, амортизаційними відрахуваннями та ін.

Для значень  $V_c = 5$ ,  $\Delta r = 2 \cdot 10^7$ ,  $t_k = 1 \cdot 10^5$  графіки залежностей МС витрат  $Ed(s)$ ,  $Ee(s)$ ,  $El(s)$  відповідно показано на рис. 2.

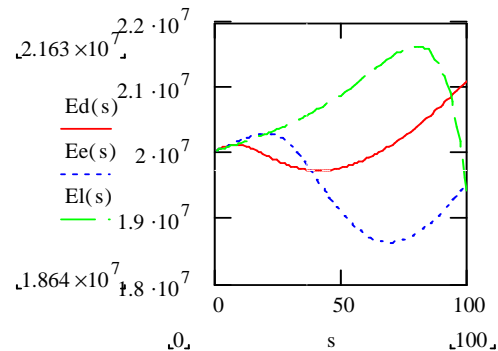


Рис. 2. Графіки залежностей  $E(s)$

Формулюючи, наприклад, критерій  $K_1$  у вигляді  $(Y^{\text{пр}} = E(s)) \leq 2 \cdot 10^7$ , бачимо ( $Ed(s)$  на рис. 2), що стратегія  $A$  прийнятна для значень  $16 \leq sd \leq 66$ , тобто стратегічно техніко-економічна політика, яка проводиться ТК, допускає не нульовий ризик можливої катастрофічної події на межі ймовірнісного показника надійності експлуатації техніки й транспортного судна в цілому, якщо  $\lambda d(s) \leq 3.65 \cdot 10^{-5}$  (рис. 1).

Відповідно до того ж таки критерію  $K_1$  стратегія  $B$  ( $Ee(s)$  на рис. 2) прийнятна в діапазоні  $32 \leq se \leq \max$ . Причому, починаючи зі значень інтенсивності  $se \geq 37$  (точка перетину графіків залежностей  $Ed(s)$  та  $Ee(s)$  на рис. 2), вона стає усе більш привабливішою, на відміну від стратегії  $C$ , яка майже неприйнятна. Але стосовно показника надійності експлуатації техніки й транспортного судна в цілому  $\lambda e(s) \leq 2.82 \cdot 10^{-5}$  (рис. 1).

Таким чином, міркування може бути таким:

1) хоча МС витрат є тим самим  $Ed(s) = Ee(s) = 2 \cdot 10^7$ ,

але надійність вища ніж  $(\lambda e(s) = 2.82 \cdot 10^{-5}) < (\lambda d(s) = 3.65 \cdot 10^{-5})$  для більшої інтенсивності її підтримання

$(se = 32) > (sd = 16)$ ;

2) хоча й оцінюється така надійність як  $(\lambda e(s) = 2.82 \cdot 10^{-5}) < (\lambda d(s) = 3.65 \cdot 10^{-5})$

більш прийнятний випадок

$(se = 32) > (sd = 16)$ ,

але середній фінансовий результат буде однаковим

$Ed(s) = Ee(s) = 2 \cdot 10^7$ ;

3) якщо надійність на задовільному рівні, то не слід платити більше;

4) якщо інтенсивніше проводити заходи щодо підтримання безпеки функціонування ТК, то краще при цьому мати менш імовірні середні витрати.

### Практичне застосування розв'язку задачі

Дослідимо варіанти вибору стратегії підтримання безпеки функціонування ТК.

Вибираючи МС витрат за розрахунковий період експлуатації транспортного судна у вигляді виразів (13)–(15) як визначальний показник для складання критерію, доцільно оцінити вплив величини можливих раптових збитків  $\Delta r$ .

Тоді з урахуванням  $\Delta r$ , отримуємо МС у вигляді залежності від двох змінних  $Ed(s, \Delta r)$ ,  $Ee(s, \Delta r)$ ,  $El(s, \Delta r)$ .

Поверхні, які при цьому утворюються, показано на рис. 3.

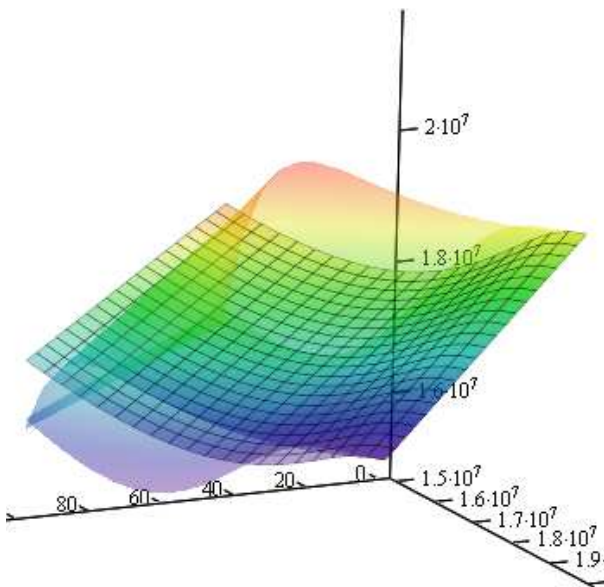


Рис. 3. Графіки залежностей  $E(s, \Delta r)$

Варіанти вибору техніко-економічної поведінки ТК у такому випадку, можуть відповідати критеріям:

$K_1$  – стратегія  $A$  за значення  $16 \leq sd \leq 66$ , стратегія  $B$ , якщо  $32 \leq se \leq \max$ , для  $\Delta r = 2 \cdot 10^7$ ;

$K_2$  :  $\min E(s) | (\Delta r = (\text{const} \neq 0))$  – для  $\Delta r = 2 \cdot 10^7$ , якщо  $66 \leq se \leq 72$ , стратегія  $B$ ,  $(Ee_{\min}(s) = 1.87 \cdot 10^7) < (Ed_{\min}(s) = 1.97 \cdot 10^7)$ , якщо  $36 \leq sd \leq 46$ ;

$K_3$  :  $\min E(s) | [\Delta r = (\text{const} \neq 0), s = (\text{const} \neq 0)]$

залежно від відповідних значень  $\Delta r$  та  $s$ ;

$K_4$  :  $\min E(s) \left\{ \begin{array}{l} \Delta r = (\text{const} \neq 0), \\ [s_{\min} = (\text{const}_1 \neq 0)] \leq \\ \leq s \leq [s_{\max} = (\text{const}_2 \neq 0)] \end{array} \right\}$

залежно від відповідних значень  $\Delta r$  та  $s$ .

Вибирати техніко-економічні характеристики ТК можуть і за іншими критеріями, для формулювання яких ураховуються параметри, вплив котрих досліджується, або які вважаються визначальними для відповідної постановки конкретної задачі. При цьому визначальними параметрами можуть бути будь-які з них. До того ж динамічні властивості техніко-економічної поведінки ТК враховуються через відповідні функціональні або стохастичні залежності показників та параметрів від часу.

Зокрема, експлуатаційні властивості суднових енергетичних установок, на моніторинг технічного стану яких витрачаються значні ресурси, також є у певному сенсі динамічними характеристиками. Багатоальтернативність експлуатаційних ситуацій викликає необхідність відповідного прийняття управлінських рішень в умовах невизначеності.

Підтримання належного технічного стану суднової енергетики здійснюється при обмеженнях ресурсів, серед яких важливу роль відіграють фактори наявної інформації, часу, вартості, якості, ефективності та ін. Віддання переваг при прийнятті рішень залежатиме від суб'єктивних властивостей відповідальної ОПР. У праці [6], наприклад, моделюється вплив суб'єктивних переваг при обранні альтернативної бази для ремонту суднової енергетичної установки на показники надійності функціонування.

Розглядається зміна у часі таких важливих характеристик, як ймовірності перебування у працездатному стані та у стані ремонту.

При реалізації обраних стратегій можливою є потреба у корегуванні. Таким чином виникає ряд питань, що розв'язуються за допомогою методів варіаційного обчислення.

Існує [4] багато можливих постановок варіаційних задач на умовний екстремум з корисностями функцій колективної корисності як основного компонента функціоналу. Наприклад, при обмежених ресурсах потрібно забезпечити максимально швидке зростання середнього благополуччя (утилітарний позиційний критерій) за умови, що швидкість зростання благополуччя самого неблагополучного суб'єкта буде не менше заданої:  $\frac{du_{\min}}{dt} \geq v_{\min}$ , а для усіх останніх

$$\frac{du_k}{dt} \geq 0 \quad (k \in \overline{2, M}).$$

## Висновки

Під час функціонування ТК, основними виробничими елементами якої є транспортні судна, виникає проблема вибору стратегії техніко-економічної політики для підтримання надійного стану технічних елементів системи та безпечної експлуатації флоту в цілому.

Розглянуті стратегії будучи способом дій для досягнення потрібного результату, відповідно до положень, викладених у довіднику [1], потребують формулювання критеріїв, які вводяться на основі певної концепції раціональної поведінки. Тобто опрацьовувати рішення через уведення критеріїв ефективності, треба за однією з трьох концепцій.

1. Відповідно до концепції придатності раціональна будь-яка стратегія, за якої обраний показник ефективності набуває значення не вищі/нижчі від деякого прийняттого рівня, у розглядуваному випадку:  $W(u) \leq W^{TP}$ ,  $u \in U$ . Обмеженими можуть бути технічна характеристика надійності системи  $\lambda(s)$ , МС витрат ТК за певний період експлуатації  $E(s)$ . Інтенсивність підтримання надійності  $s$  може бути задано у вигляді  $s \geq s^{TP}$ , або подвійної нерівності, діапазону прийнятних значень. Подібна концепція призводить до негнучкої та нецілеспрямованої системи дій.

2. Концепція оптимізації вважає раціональними ті стратегії  $u \in U$ , котрі забезпечують максимальний ефект в операції, тобто  $W(u^*) = \max/\min_{u \in U} W(u)$ . Ця концепція зумовлює цілеспрямовану, але негнучку систему дій, оскільки не враховується поточна інформація про зміни різного роду, які відбуваються у системі та поза нею при реалізації рішення  $u^*$ .

3. Концепція адаптивізації передбачає можливість оперативного реагування на поточну інформацію, що надходить, про зміни комплексу умов. У цьому випадку раціональною слід вважати таку адаптивну стратегію  $u(t)$  із множини  $U(t, \tau)$ , котра забезпечує, наприклад, виконання умови:

$$W_t(u^*(t), \tau) \geq W_t^{TP}(u(t), \tau), \quad u(t) \in U(t, \tau),$$

де

$t$  – час;

$\tau$  – упередження прогнозу.

Запис  $W_t$  означає, що показник ефективності може змінюватися у часі. Концепція адаптивізації сприяє цілеспрямованій та гнучкій системі дій.

Відповідно до праць [2–5] ОПр притаманна властивість суб'єктивного сприйняття ризику.

## Література

1. Надежность и эффективность в технике: справ. – В 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.
2. Касьянов В.А. Элементы субъективного анализа: моногр. / В.А. Касьянов. – К.: НАУ, 2003. – 224 с.
3. Касьянов В.А. Субъективный анализ и безопасность активных систем / В.А. Касьянов, А.В. Гончаренко // Кибернетика и вычислительная техника. – 2004. – Вып. 142. – С. 41–56.
4. Касьянов В.А. Субъективный анализ: моногр. / В.А. Касьянов. – К.: НАУ, 2007. – 512 с.
5. Гончаренко А.В. Керування підтриманням безпеки польотів через технічні та витратні чинники: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.03 / А.В. Гончаренко. – К., 2005. – 198 с.
6. Гончаренко А.В. Вплив суб'єктивних переваг на показники роботи судової енергетичної установки / А.В. Гончаренко // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 2008. – № 2 (22). – С. 105–111.