

УДК 681.3

**О.П. Ротштейн, д.т.н., проф.**  
Єрусалимський політехнічний інститут  
**О.М. Козачко, к.т.н., доц.**  
Вінницький національний технічний університет

## ОЦІНКА ПАРАМЕТРИЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ЛЮДИНО-МАШИНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ МОЖЛИВОСТІ

*В роботі запропоновано новий підхід до оцінки параметричної надійності людино-машинних систем. Суть підходу полягає у використанні функції належності нечітких множин, які залежать від відповідних параметрів і моделюють розподіли можливості правильного виконання елементів процесу функціонування системи. Запропонований підхід ілюструється на прикладі людино-машинної системи дозаправки судна паливом на плаву в морі.*

**Мета дослідження та постановка задачі.** Імовірнісна теорія надійності людино-машинних систем [1, 2] дозволяє оцінювати безпомилковість виконання системою задачі на основі алгоритму функціонування і статистичних даних про безпомилковість робочих і контрольних операцій. Застосування імовірнісних моделей передбачає наявність чітких меж між правильними і неправильними результатами виконання елементів алгоритму (бінарний підхід: 1 – правильно, 0 – неправильно). У роботі [3] запропоновано підхід до оцінки надійності алгоритмів діяльності на основі описових засобів структурного методу А.І. Губінського і обчислювальних засобів теорії можливості Заде [4]. Як вхідні дані для розрахунку в [3] пропонується використовувати не (як в традиційній теорії [1, 2]), а функції належності «нечіткого правильного» і «нечіткого неправильного» результатів виконання операцій.

Дана стаття є продовженням роботи [3] і має на меті продемонструвати новий ефект від застосування теорії можливості [4] до оцінки надійності людино-машинної системи. Суть ефекту полягає в оцінці так званої «параметричної складової» надійності, тобто здатності системи виконувати заданий алгоритм при різних значеннях параметрів, що впливають на правильність процесу функціонування. Простим прикладом «параметрів» є температура паяльника, яка суттєво впливає на правильність (надійність) виконання операції «пайка».

*Мова описання людино-машинних систем.* Для формалізації процесу функціонування людино-машинної системи в [3] використовується мова алгоритмічних алгебр В.М. Глушкова [5]. У цій мові оператори позначаються великими латинськими літерами ( $A, B, C, \dots$ ), а логічні умови – маленькими грецькими літерами ( $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ ).

Оператор  $A$  – це відображення інформаційної множини  $M$  в себе, тобто перетворення виду  $M' = A(M)$ , де  $M$  і  $M'$  – стан системи до і після виконання оператора  $A$ .

Логічна умова  $\omega$  – це відображення поточного стану системи в двоелементну множину  $\{1, 0\}$ , де 1 – правда; 0 – неправда.

*Параметрична надійність елементів.* Елементами процесу функціонування системи є робочі й контрольні операції.

*Робоча операція* [1] – це елемент процесу функціонування системи, без правильного виконання якого завдання не може бути виконане.

Нехай  $A$  – оператор, виконання якого відповідає робочій операції. З кожним оператором  $A$  зв'язуватимемо параметр  $x_A$ , значення якого задане на універсальній множині  $V_A$  і визначає можливість правильного виконання оператора  $A$ .

Функції розподілу можливості правильного і неправильного виконання оператора  $A$  визначимо так [3]:

$$\mu_A^1 = \int_{V_A} \mu^1(x_A) / x_A, \quad \mu_A^0 = \int_{V_A} \mu^0(x_A) / x_A, \quad (1)$$

де  $\mu^1(x_A)$  та  $\mu^0(x_A)$  – можливість правильного і неправильного виконання оператора  $A$ , які залежні від значення параметра  $x_A$ , причому  $\mu^1(x_A) + \mu^0(x_A) = 1$ .

*Контрольні операції* [1] вводяться в процес функціонування для підвищення надійності його виконання за рахунок виявлення помилок в робочих операціях.

Нехай  $\omega_A$  – логічна умова, яка перевіряється при контролі правильності виконання оператора  $A$ . При виконанні умови  $\omega_A$  можливі такі результати: 11(10) – правильне виконання оператора  $A$  визнано дійсно правильним (неправильним); 00(01) – неправильне виконання оператора  $A$  визнано дійсно неправильним (правильним). Результати 10 і 01 відповідають помилкам 1-го і 2-го роду.

Параметрична надійність виконання контролю  $\omega_A$  визначається так [3]:

$$\left. \begin{aligned} \mu_{\omega}^{11} &= \int_{V_A} \mu^{11}(x_A) / x_A, & \mu_{\omega}^{10} &= \int_{V_A} \mu^{10}(x_A) / x_A, \\ \mu_{\omega}^{00} &= \int_{V_A} \mu^{00}(x_A) / x_A, & \mu_{\omega}^{01} &= \int_{V_A} \mu^{01}(x_A) / x_A, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де  $\mu^{11}(x_A) [\mu^{10}(x_A)]$  – розподіл можливості виконання умови  $\omega_A$  без помилки 1-го роду (з помилкою 1-го роду), причому  $\mu^{11}(x_A) + \mu^{10}(x_A) = 1$  ;

$\mu^{00}(x_A) [\mu^{01}(x_A)]$  – розподіл можливості виконання умови  $\omega_A$  без помилки 2-го роду (з помилкою 2-го роду), причому  $\mu^{00}(x_A) + \mu^{01}(x_A) = 1$  .

У роботі [4] функції  $\mu^{11}(x_A)$  та  $\mu^{00}(x_A)$  запропоновано представляти у вигляді:

$$\mu^{11}(x_A) = (\mu^1(x_A))^{k1}, \quad \mu^{00}(x_A) = (\mu^0(x_A))^{k0} \quad (3)$$

де  $k1 (k0)$  коефіцієнт схильності контролю  $\omega_A$  до здійснення помилок 1-го (2-го) роду, причому  $k1$  і  $k0$  можуть набувати значень 0, 1, 2.. За допомогою цих коефіцієнтів можна враховувати різну схильність контролера до здійснення помилок 1-го і 2-го роду.

*Параметрична надійність алгоритмічних структур.* Алгоритмічна структура – це така комбінація операторів і логічних умов, для яких отримано математичні моделі, що дозволяють замінити її єдиним оператором з еквівалентними характеристиками надійності. У теорії надійності людино-машинних систем найбільш поширені такі алгоритмічні структури [1]: «послідовна», «робота–контроль» та «діагностика–ремонт». У роботі [3] отримано моделі, що дозволяють розрахувати розподіли правильності виконання цих структур за допомогою відповідних функцій належності. Ці моделі наведено в табл. 1, де позначено:

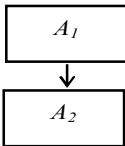
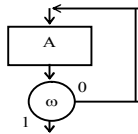
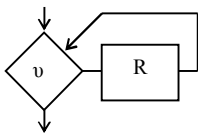
$x_v$  – параметр працездатності обладнання, що перевіряється діагностичним контролем;

$x_R$  – параметр правильності ремонту;

$v$  і  $R$  – логічна умова і оператор, відповідні діагностичному контролю і операції ремонту.

Таблиця 1

Моделі надійності типових алгоритмічних структур

Назва	Позначення	Граф-схема	Еквівалентні характеристики
Послідовна	$B = A_1 \cdot A_2$		$\mu_B^1 = \mu^1(x_{A_1}) \cdot \mu^1(x_{A_2})$
Робота–контроль	$C = \{A\}_{\omega}$		$\mu_C^1 = \frac{\mu^1(x_A) \cdot \mu^{11}(x_A)}{1 - \mu^1(x_A) \cdot \mu^{10}(x_A) - \mu^0(x_A) \cdot \mu^{00}(x_A)}$
Діагностика–ремонт	$D = \{R\}_v$		$\mu_D^1 = a + b \cdot a_1 \cdot \frac{1}{1 - b_1}$ $a = \mu^1(x_v) \cdot \mu^{11}(x_v); \quad a_1 = \mu^1(x_R) \cdot \mu^{11}(x_v)$ $b = \mu^1(x_v) \cdot \mu^{10}(x_v) + \mu^0(x_v) \cdot \mu^{00}(x_v)$ $b_1 = \mu^1(x_R) \cdot \mu^{10}(x_v) + \mu^0(x_R) \cdot \mu^{00}(x_v)$

Використання моделей надійності з табл. 1 дозволяє перетворити алгоритм функціонування людино-машинної системи до єдиного робочого оператора з еквівалентною функцією розподілу можливості.

*Приклад людино-машинної системи.* Розглядається людино-машинна система дозаправки судна паливом на плаву в морі. У реальних умовах плавання ця задача виникає достатньо часто і вимагає організації виконання дій за таким алгоритмом [6]:

$$Y = A_1 \cdot \{R\} \cdot \{A_2\} \cdot \{A_3\} \cdot A_4, \tag{4}$$

- де  $A_1$  – включення системи і механізмів дозаправки;
- $v$  – умова працездатності технічних засобів;
- $R$  – виявлення і усунення несправності в системі;
- $A_2$  – введення системи дозаправки в робочий режим;
- $\omega_1$  – функціональний контроль оператором правильності введення системи в робочий режим;
- $A_3$  – автоматичне перекачування палива з танкера в трюм судна;
- $\omega_2$  – функціональний контроль роботи системи в автоматичному режимі з метою запобігання витoku палива в море;
- $A_4$  – закінчення дозаправки і розстикування системи.

Система, необхідна для перекачування палива має послідовно-паралельну структуру, якій відповідає логічний опис:

$$v = (v_1 \vee v_2) \wedge (v_3 \vee v_4), \tag{5}$$

де  $v_1(v_3)$  – умова працездатності системи дозаправки танкера (судна);

$v_2(v_4)$  – умова працездатності резервної системи дозаправки танкера (судна).

Якщо припустити, що  $V = v_1 = v_2 = v_3 = v_4$ , то розподіл можливості працездатності системи представляється так:

$$\mu^1(x_v) = [1 - (1 - \mu_v^1(x_v))^n]^2, \tag{6}$$

де  $\mu_v^1(x_v)$  – функція розподілу можливості працездатності технічного елемента системи, яка залежить від параметра  $x_v$ ;

$n$  – кратність резервування системи (у нашому випадку  $n = 2$ ).

Параметри, що впливають на правильність виконання операторів і логічних умов, що входять в алгоритм (4), наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри, що впливають на надійність

Елемент алгоритму	Параметр	Зміст параметра	Межа
$A_1, A_2, A_4$	$x_H$	Темпова напруженість вахтового оператора	[0, 1]
$A_3$	$x_s$	Швидкість перекачування	[7, 11] л/с
$R$	$x_B$	Кваліфікація вахтового оператора	[0, 100] бал.
$V = v_1 = \dots = v_4$	$x_N$	Потужність насосів	[30, 90] кВт

*Оцінка параметричної надійності.* Можливість правильного виконання алгоритму дозаправки (4) оцінювалася при таких значеннях параметрів:  $x_H = 0,3, x_s = 11, x_B = 87, x_N = 47$ . На рис. 1 показана процедура отримання необхідних вхідних даних на основі заданих розподілів правильності виконання операторів і діагностичного контролю  $v$ . Розподіли правильності виконання надійності  $\omega_1$  і  $\omega_2$  отримані за формулою (3) при  $k_1 = k_0 = 1$ , що згідно з [3] відповідає об'єктивному і пильному контролерові.

У табл. 3 представлено покрокове укрупнення алгоритму дозаправки (4). З цієї таблиці видно, що можливість правильного виконання алгоритму дозаправки судна складає 0,949. Укрупнення алгоритму проводилося за допомогою моделей надійності з табл. 1.

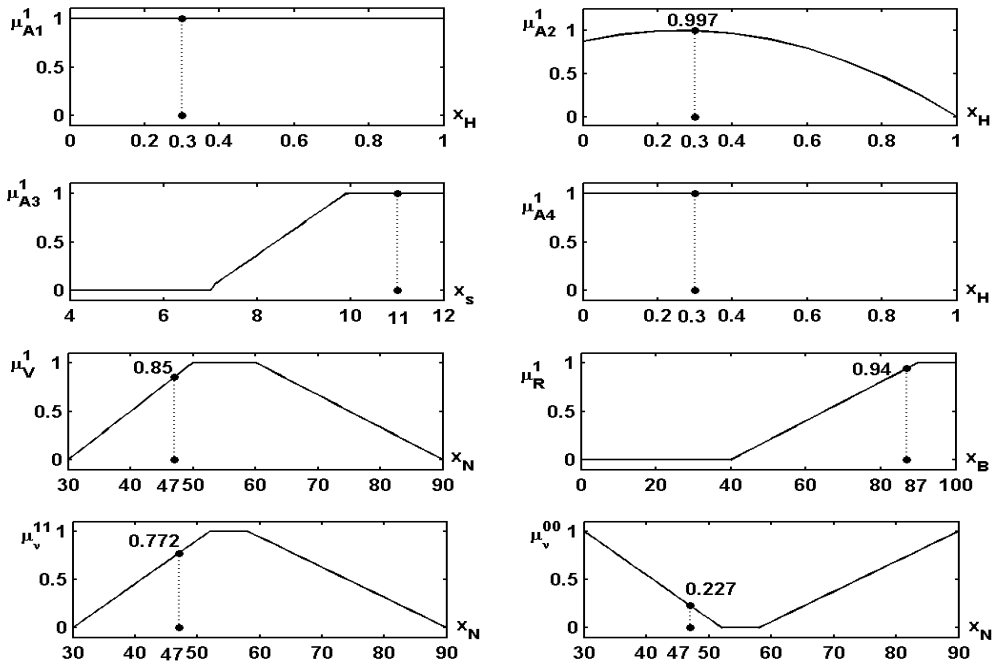


Рис. 1. Розподіли правильності виконання операторів і логічної умови  $v$

Таблиця 3

Покрокове укрупнення алгоритму дозаправки (4)

Крок	Характеристики операторів і логічних умов	Алгоритмічна структура	Еквівалентні характеристики
1	$\mu_V^1 = 0,850$ ; $\mu_v^{11} = 0,772$ ; $\mu_v^{00} = 0,227$ ; $\mu_R^1 = 0,940$	$Y_1 = \{R\}_v$	$\mu_{Y_1}^1 = 0,952$
2	$\mu_{Y_1}^1 = 0,952$ ; $\mu_{A_1}^1 = 1$	$Y_2 = A_1 \cdot Y_1$	$\mu_{Y_2}^1 = 0,952$
3	$\mu_{A_2}^1 = 0,997$ ; $\mu_\omega^{11} = 0,997$ ; $\mu_\omega^{00} = 0,003$	$Y_3 = \{A_2\}_{\omega_1}$	$\mu_{Y_3}^1 = 0,997$
4	$\mu_{Y_2}^1 = 0,952$ ; $\mu_{Y_3}^1 = 0,997$	$Y_4 = Y_2 \cdot Y_3$	$\mu_{Y_4}^1 = 0,949$
5	$\mu_{A_3}^1 = 1$ ; $\mu_\omega^{11} = 1$ ; $\mu_\omega^{00} = 0$	$Y_5 = \{A_3\}_{\omega_2}$	$\mu_{Y_5}^1 = 1$
6	$\mu_{Y_4}^1 = 0,949$ ; $\mu_{Y_5}^1 = 1$	$Y_6 = Y_4 \cdot Y_5$	$\mu_{Y_6}^1 = 0,949$
7	$\mu_{Y_6}^1 = 0,949$ ; $\mu_{A_4}^1 = 1$	$Y = Y_6 \cdot A_4$	$\mu_Y^1 = 0,949$

Являє інтерес аналіз чутливості можливості правильного виконання алгоритму (4) до таких параметрів:

- темпова напруженість вахтового оператора  $x_H$  з різними значеннями його ремонтної кваліфікації  $x_B$ ;
- швидкість перекачування палива  $x_S$  з різними значеннями коефіцієнта  $k_1$  для контролю правильності його перекачування;
- кратності резервування насосів  $n$  з різними значеннями потужності  $x_N$ .

Результати цього аналізу представлено на рис. 2.

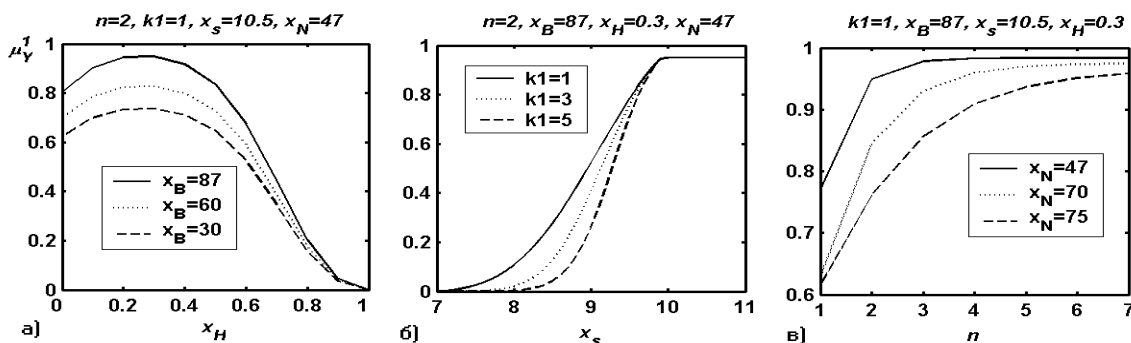


Рис. 2. Залежності правильності виконання алгоритму дозаправки (4) від зміни параметрів: а)  $x_H$ ; б)  $x_s$ ; в)  $n$

З рис. 2 видно, що зниження рівня ремонтної кваліфікації вахтового оператора і збільшення помилок при контролі перекачування палива призводить до зниження можливості правильного виконання алгоритму дозаправки (4). Крім того, зростання потужності насосів призводить до зниження їх працездатності (рис. 1), що, в свою чергу, вимагає збільшення кратності резервування системи.

**Висновок.** Нами розглянуто основи нового методу і приклад розрахунку параметричної надійності людино-машинних систем на основі застосування теорії алгоритмів і теорії нечітких множин. Суть методу полягає в тому, що як початкові дані для розрахунку пропонується використовувати розподіли можливості правильного і неправильного виконання робочих і контрольних операцій алгоритму функціонування системи. Перевага такого підходу полягає в тому, що він спирається лише на експертні знання і не вимагає трудомістких експериментів зі збору необхідних статистичних даних. Можливими сферами застосування запропонованого підходу є не лише теорія надійності людино-машинних систем, але і теорія оцінки безпеки і ризику в технічних і економічних системах.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Губинский А.И. Надежность и качество функционирование эргатических систем. – Л.: Наука, 1982. – 280 с.
2. Ротштейн А.П., Кузнецов П.Д. Проектирование бездефектных человеко-машинных технологий. – К.: Техніка, 1992. – 198 с.
3. Ротштейн А.П. Нечеткий анализ надежности алгоритмов деятельности // Надежность. – 2007. – № 3. – С. 3–16.
4. Zadeh L.A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility // Fuzzy Sets and System. – 1978. – № 1. – С. 12–45.
5. Глушков В.М., Цейтлин Г.Е., Юценко Е.Л. Алгебра. Языки. Программирование. – К.: Наук. думка, 1978. – 320 с.
6. Чабаненко П.П., Халаев Ю.Н. Эргономические приемы выявления резервов эффективности судовых систем. – Севастополь: ВСНТО, 1987. – 54 с.

РОТШТЕЙН Олександр Петрович – доктор технічних наук, професор Єрусалимського політехнічного інституту Махон Лев.

Наукові інтереси:

- нечітка логіка;
- надійність складних систем;
- методи оптимізації.

E-mail: [rothstei@jtc.ac.il](mailto:rothstei@jtc.ac.il)

КОЗАЧКО Олексій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної та комп'ютерної графіки Вінницького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- надійність складних систем;
- нечітка логіка;
- математичне моделювання.

Тел.: 8(0432)538466; 80956043645.

E-mail: [leko\\_80@mail.ru](mailto:leko_80@mail.ru)

Подано 12.01.09

**Ротшейн О.П., Козачко О.М.** Оцінка параметричної надійності людино-машинних систем на основі теорії можливості

**Ротшейн А.П., Козачко А.Н.** Оценка параметрической надежности человеко-машинных систем на основе теории возможности

УДК 681.3

**Оценка параметрической надежности человеко-машинных систем на основе теории возможности / А.П. Ротшейн, А.Н. Козачко**

В работе предложен новый подход к оценке параметрической надежности человеко-машинных систем. Суть подхода заключается в использовании функции принадлежности нечетких множеств, которые зависят от соответствующих параметров и моделируют распределения возможности правильного выполнения элементов процесса функционирования системы. Предложенный подход иллюстрируется на примере человеко-машинной системы дозаправки судна допливом на ходу в море.