УДК 681.3
С. Д. Штовба, к. т. н., доц.

МАТРИЧНІ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ АЛГОРИТМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА СУМІСНОСТІ ПОМИЛОК РІЗНИХ ТИПІВ

Запропоновано ймовірнісні матричні моделі надійності операторів та логічних умов, які враховують можливість суміщення помилок різних типів під час виконання алгоритмічного процесу. Встановлено, що відомі багатоарні моделі надійності алгоритмічних структур за несумісних помилок, залишаться правильними і при підстановці в них запропонованих матричних моделей надійності операторів та логічних умов.

Вступ

Розглядаються *алгоритмічні процеси* (АП), тобто розгорнута у часі послідовність дій, операцій або робіт, виконання яких забезпечує досягнення мети — отримання інформації, знань, документації, продукції тощо [1, 2]. Узагальненим показником надійності АП виступає ймовірність досягнення мети, яка для прикладних задач інтерпретується як безпомилковість, бездефектність, достовірність, своєчасність тощо [3]. Основою моделювання надійності АП є *алгоритмічні структури* у вигляді типових комбінацій основних та допоміжних операцій. Для алгоритмічних структур розроблено моделі розрахунку показників надійності за ймовірносно-часовими характеристиками безпомилкового виконання окремих операцій.

Значний вклад в теорію надійності АП внесли роботи І. Сафонова з оптимізації алгоритмів [4, 5], школи А. Губінського з надійності людино-машиних систем [3, 6—9], Б. Вігмана та Г. Дружиніна з надійності технологічних процесів [10, 11], О. Ротштейна з надійності трудових процесів [12] та інших науковців. В більшості робіт моделювання та оптимізація надійності АП здійснюється за бінарною концепцією врахування помилок, де розрізняються лише два стани виконання АП — з помилками або без помилок. Між собою помилки не розрізняються, тобто не важливо, яка саме помилка зроблена. В багатьох реальних задачах використання бінарної концепції врахування помилок є недоцільним, оскільки для різних типів помилок різняться ймовірності їх внесення, виявлення та усунення, так само як і витрати на ці процедури.

В книзі [12] та в роботах [13, 14], що їй передували, О. Ротштейн для врахування помилок різних типів запропонував компактні матричні моделі надійності операторів, логічних умов та алгоритмічних структур. Обмеження цих моделей надійності полягає в тому, що вони розроблені для випадку помилок несумісних типів. Несумісними помилками є, наприклад, такі результати виконання операції складання механічного пристрою: а) недокручена гайка та б) занадто затягнута гайка. Прикладом сумісних помилок є підготовка документу з орфографічними, синтаксичними та стилістичними помилками. В окремому документі можуть зустрічатися як помилки лише одного типу, так і парні (наприклад, орфографічні та синтаксичні), і потрійні.

Метою статті є підвищення адекватності прогнозування надійності АП за рахунок узагальнення матричних багатоарних моделей надійності [12] на випадок помилок сумісних типів. Стаття організована таким чином: спочатку наводяться матричні моделі надійності для помилок несумісних типів [12], далі розробляється спосіб опису станів з сумісними помилками та пропонуються нові матричні моделі надійності. Статтю завершує ілюстративний приклад розрахунку надійності АП з помилками функціонування сумісних типів.

1. Матричні моделі надійності за несумісних помилок

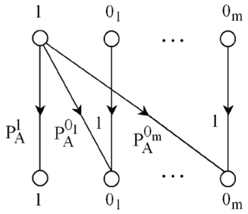
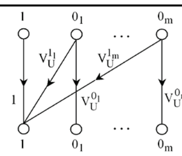
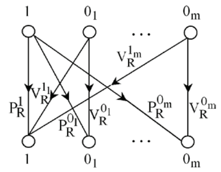
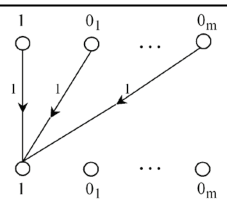
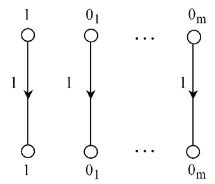
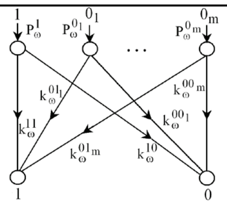
Позначимо через m — кількість різних типів помилок функціонування АП. За несумісних помилок АП може перебувати в одному з таких станів: 1 — помилки відсутні, 0_1 — наявна помилка лише 1-го типу, 0_2 — наявна помилка лише 2-го типу,..., 0_m — наявна помилка лише m-го типу. Відповідно, для опису ймовірнісних характеристик операторів та логічних умов достатньо матриці розміром $(m + 1)\times(m + 1)$, в якій кожен елемент задає ймовірність переходу між станами.

Моделювання надійності АП зазвичай здійснюють за допомогою таких операторів та логічних умов [12]: *робочий оператор A*, під час виконання якого помилки можуть бути внесені, але не виявлені і не усунені; *доброблення R*, під час виконання якої усуваються раніше внесені помилки, при цьому не виключається поява нових помилок; *доброблення U*, під час виконання якої усуваються раніше внесені помилки, при цьому нові помилки не вносяться; *оновлення Z*, під час якого заміню-ється предмет діяльності на новий; *тотожний оператор E*, який не змінює стан системи; *контроль* ω, під час виконання якого внесені помилки виявляються.

Матричні моделі надійності операторів та логічних умов зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Моделі надійності операторів та логічних умов [12]

Елемент	Граф-схема переходів	Матрична модель надійності
A		$\mathbf{P}_A = \begin{bmatrix} P_A^1 & P_A^{0_1} & \dots & P_A^{0_m} \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$
U		$\mathbf{P}_U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ V_U^{1_1} & V_U^{0_1} & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ V_U^{1_m} & 0 & \dots & V_U^{0_m} \end{bmatrix}$
R		$\mathbf{P}_R = \begin{bmatrix} P_R^1 & P_R^{0_1} & \dots & P_R^{0_m} \\ V_R^{1_1} & V_R^{0_1} & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ V_R^{1_m} & 0 & \dots & V_R^{0_m} \end{bmatrix}$
Z		$\mathbf{P}_Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$
E		$\mathbf{P}_E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$
ω		$\mathbf{K}_\omega^1 = \begin{bmatrix} k_\omega^{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_\omega^{01_1} & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & k_\omega^{01_m} \end{bmatrix}$ $\mathbf{K}_\omega^0 = \begin{bmatrix} k_\omega^{10} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_\omega^{00_1} & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & k_\omega^{00_m} \end{bmatrix}$

В табл. 1. використовуються такі позначення:

P_A^1 — ймовірність безпомилкового виконання оператора A;

$P_A^{0_j}$ — ймовірність внесення помилки j-го типу оператором A, $j = \overline{1, m}$;

$V_U^{1_j}$ $\left(V_U^{0_j}\right)$ — ймовірність усунення (не усунення) помилки j-го типу добробленням U;

V_R^{1j} $\left(V_R^{0j}\right)$ — ймовірність усунення (не усунення) помилки *j*-го типу доробленням *R*;

P_R^1 — ймовірність невнесення помилок під час дороблення *R*;

P_R^{0j} — ймовірність внесення помилки *j*-го типу під час дороблення *R*, k_ω^{11} $\left(k_\omega^{10}\right)$ — ймовірність того, що відсутність помилок контролем ω ідентифіковано правильно (неправильно);

k_ω^{01j} $\left(k_\omega^{00j}\right)$ — ймовірність пропуску (виявлення) помилки *j*-го типу контролем ω.

Для елементів матриць з табл. 1 мають місце такі співвідношення:

$$P_A^1 + \sum_{j=\overline{1,\,m}} P_A^{0j} = 1\,; \quad V_U^{1j} + V_U^{0j} = 1\,,\ j = \overline{1,\,m}\,; \quad P_R^1 + \sum_{j=\overline{1,\,m}} P_R^{0j} = 1\,;$$

$$V_R^{1j} + V_R^{0j} = 1\,,\ j = \overline{1,\,m}\,; \quad k_\omega^{11} + k_\omega^{10} = 1\,; \ k_\omega^{00j} + \sum_{j=\overline{1,\,m}} k_\omega^{01j} = 1\,.$$

Моделюючи надійність, найчастіше застосовують такі алгоритмічні структури:

$A_1 A_2$ — виконання робочих операторів A_1 та A_2 в порядку запису;

A^N — виконання робочого оператора *A* рівно *N* раз;

$[A_1,\ A_2]$ — паралельне виконання різних задач операторами A_1 та A_2;

$(A_1 \underset{\omega}{\vee} A_2)$ — виконання робочого оператора A_1 за істинності умови (ω = 1) та робочого оператора A_2 в протилежному випадку, тобто коли ω = 0;

$A(E \underset{\omega}{\vee} U)$ та $A(E \underset{\omega}{\vee} R)$ — виконання робочого оператора *A*, контролю ω та дороблення (*U* або *R*) у разі виявлення помилок;

$A(E \underset{\psi}{\vee} (E \underset{\omega}{\vee} U))$ та $A(E \underset{\psi}{\vee} (E \underset{\omega}{\vee} R))$ — виконання робочого оператора *A*, який з ймовірністю p_ψ потрапляє на контроль ω та у разі виявлення помилок — на дороблення (*U* або *R*);

$\{ZA\}_{\omega}$ — циклічне виконання оператора оновлення *Z* та робочого оператора *A*. Цикл закінчується якщо контролем ω не знайдено помилок виконання останнього оператора *A*;

$A\{E \underset{\omega}{\vee} U\}$ та $A\{E \underset{\omega}{\vee} R\}$ — виконання робочого оператора *A* та циклу контроль ω — дороблення (*U* або *R*) у разі виявлення помилок.

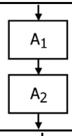
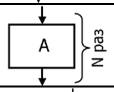
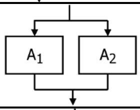
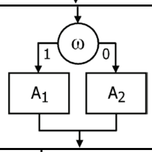
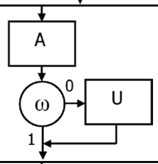
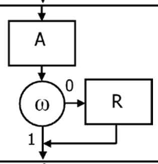
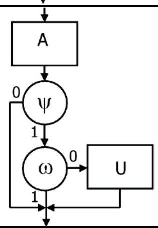
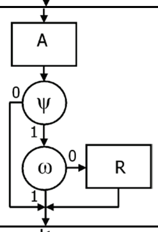
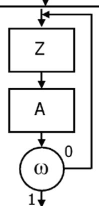
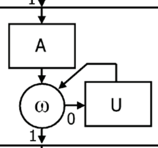
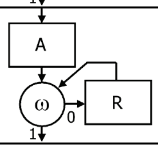
Моделі надійності типових алгоритмічних структур зведені в табл. 2, в якій використовуються такі нові позначення:

$\mathbf{P}$ — матриця переходів еквівалентного робочого оператора;

$\mathbf{I}$ — одинична матриця.

Таблиця 2

Моделі надійності алгоритмічних структур [12, 14]

Структура	Схема	Моделі надійності
$A_1 A_2$		$\mathbf{P} = \mathbf{P}_{A_1}\mathbf{P}_{A_2}$
A^N		$\mathbf{P} = \mathbf{P}_A^N$
$[A_1,\ A_2]$		$\mathbf{P} = \mathbf{P}_{A_1}\mathbf{P}_{A_2}$
$\underset{\omega}{(}A_1 \vee A_2)$		$\mathbf{P} = \mathbf{P}_\omega\left(\mathbf{K}_\omega^1\mathbf{P}_{A_1} + \mathbf{K}_\omega^0\mathbf{P}_{A_2}\right)$
$A\underset{\omega}{(}E \vee U)$		$\mathbf{P} = \mathbf{P}_A\mathbf{K}_\omega^1 + \mathbf{P}_A\mathbf{K}_\omega^0\mathbf{P}_U$
$A\underset{\omega}{(}E \vee R)$		$\mathbf{P} = \mathbf{P}_A\mathbf{K}_\omega^1 + \mathbf{P}_A\mathbf{K}_\omega^0\mathbf{P}_R$
$A\underset{\psi}{(}E \vee \underset{\omega}{(}E \vee U))$		$\mathbf{P} = (1 - p_\psi)\mathbf{P}_A + p_\psi\left(\mathbf{P}_A\mathbf{K}_\omega^1 + \mathbf{P}_A\mathbf{K}_\omega^0\mathbf{P}_U\right)$
$A\underset{\psi}{(}E \vee \underset{\omega}{(}E \vee R))$		$\mathbf{P} = (1 - p_\psi)\mathbf{P}_A + p_\psi\left(\mathbf{P}_A\mathbf{K}_\omega^1 + \mathbf{P}_A\mathbf{K}_\omega^0\mathbf{P}_R\right)$
$\{ZA\underset{\omega}{\}}$		$\mathbf{P} = \mathbf{P}_Z\mathbf{P}_A\mathbf{K}_\omega^1\left(\mathbf{I} - \mathbf{P}_Z\mathbf{P}_A\mathbf{K}_\omega^0\right)^{-1}$
$A\underset{\omega}{\{}E \vee U\}$		$\mathbf{P} = \mathbf{P}_A\mathbf{K}_\omega^1\left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_\omega^0\mathbf{P}_U\right)^{-1}$
$A\underset{\omega}{\{}E \vee R\}$		$\mathbf{P} = \mathbf{P}_A\mathbf{K}_\omega^1\left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_\omega^0\mathbf{P}_R\right)^{-1}$

 ISSN 1997-9266. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2007. № 4

Ідея врахування сумісності помилок різних типів

За умови, що усі m типів помилок є сумісними, кількість можливих станів АП дорівнюватиме 2^m. Звідси, розмір матриці переходів становитиме $2^m \times 2^m$. На рис. 1 показано матрицю переходів деякого оператора при m = 3. Ймовірності переходів позначені символом «Р». Стани системи закодовано таким чином: «111» — помилки відсутні; «110» — є помилка лише 1-го типу; «101» — є помилка лише 2-го типу; «011» — є помилка лише 3-го типу; «100» — є помилки 1-го та 2-го типів; «010» — є помилки 1-го та 3-го типів; «001» — є помилки 2-го та 3-го типів; «000» — є помилки 1-го, 2-го та 3-го типів.

Стан АП після виконання оператора

Стан АП до виконання оператора	111	110	101	011	100	010	001	000
111	$P_{111=>111}$	$P_{111=>110}$	$P_{111=>101}$	$P_{111=>011}$	$P_{111=>100}$	$P_{111=>010}$	$P_{111=>001}$	$P_{111=>000}$
110	$P_{110=>111}$	$P_{110=>110}$	$P_{110=>101}$	$P_{110=>011}$	$P_{110=>100}$	$P_{110=>010}$	$P_{110=>001}$	$P_{110=>000}$
101	$P_{101=>111}$	$P_{101=>110}$	$P_{101=>101}$	$P_{101=>011}$	$P_{101=>100}$	$P_{101=>010}$	$P_{101=>001}$	$P_{101=>000}$
011	$P_{011=>111}$	$P_{011=>110}$	$P_{011=>101}$	$P_{011=>011}$	$P_{011=>100}$	$P_{011=>010}$	$P_{011=>001}$	$P_{011=>000}$
100	$P_{100=>111}$	$P_{100=>110}$	$P_{100=>101}$	$P_{100=>011}$	$P_{100=>100}$	$P_{100=>010}$	$P_{100=>001}$	$P_{100=>000}$
010	$P_{010=>111}$	$P_{010=>110}$	$P_{010=>101}$	$P_{010=>011}$	$P_{010=>100}$	$P_{010=>010}$	$P_{010=>001}$	$P_{010=>000}$
001	$P_{001=>111}$	$P_{001=>110}$	$P_{001=>101}$	$P_{001=>011}$	$P_{001=>100}$	$P_{001=>010}$	$P_{001=>001}$	$P_{001=>000}$
000	$P_{000=>111}$	$P_{000=>110}$	$P_{000=>101}$	$P_{000=>011}$	$P_{000=>100}$	$P_{000=>010}$	$P_{000=>001}$	$P_{000=>000}$

Рис. 1. Матриця переходів оператора за трьох помилок сумісних типів

Кількість елементів матриці з рис. 1 дорівнює 2^{2m}, що призводить до великого обсягу початкових даних. Наприклад, за 5-ти типів помилок необхідно задати $2^{2 \cdot 5} = 1024$ ймовірностей переходів між станами. Обсяг початкових даних можна значно скоротити, ввівши деякі обмеження на переходи між станами. Як це зробити, розглянемо на прикладі робочого оператора.

По-перше, вважатимемо потік помилок при виконанні одного оператора ординарним [15], що означає неможливість одночасного внесення двох і більше помилок. Звідси випливає, що перехід на парні помилки можливий лише з однократних помилок, а перехід на потрійні помилки — лише з парних тощо.

По-друге, вважатимемо неможливим перехід з одного типу помилок на інші. Звідси випливає неможливість переходу між однократними помилками, між парними помилками, між трійними помилками тощо [12].

По-третє, вважатимемо, що під час виконання робочого оператора помилки лише вносяться, та не виявляються і не усуваються. Відповідно, неможливим є перехід з помилок більшої кратності на меншу [12].

По-четверте, вважатимемо процес внесення помилок однорідним [15], в якому ймовірності внесення помилок не залежать від стану системи, тобто від наявності або відсутності попередніх помилок.

Ці 4 обмеження дозволяють виразити усі ймовірності переходів через ймовірність безпомилковості та ймовірності внесення однократних помилок. Наприклад, матриця з рис. 1 перетвориться на таку, що показана на рис. 2.

Стан АП до виконання оператора	Стан АП після виконання оператора							
	111	110	101	011	100	010	001	000
111	P^1	P^{0_1}	P^{0_2}	P^{0_3}	0	0	0	0
110	0	$P^1+P^{0_1}$	0	0	P^{0_2}	P^{0_3}	0	0
101	0	0	$P^1+P^{0_2}$	0	P^{0_1}	0	P^{0_3}	0
011	0	0	0	$P^1+P^{0_3}$	0	P^{0_1}	P^{0_2}	0
100	0	0	0	0	$1-P^{0_3}$	0	0	P^{0_3}
010	0	0	0	0	0	$1-P^{0_2}$	0	P^{0_2}
001	0	0	0	0	0	0	$1-P^{0_1}$	P^{0_1}
000	0	0	0	0	0	0	0	1

$P^1 = P_{111\Rightarrow 111}$ $\quad P^{0_1} = P_{111\Rightarrow 110}$ $\quad P^{0_2} = P_{111\Rightarrow 101}$ $\quad P^{0_3} = P_{111\Rightarrow 011}$

Рис. 2. Матриця переходів робочого оператора за трьох помилок сумісних типів

З практичної точки зору доцільно усі стани з парними, потрійними та іншими багатократними помилками об'єднані в один стан «$0_\&$». Тоді матриця переходів будь-якого оператора матиме розмір (m + 2)×(m + 2). В ній перший рядок та перший стовпець відповідатимуть стану без помилок, останні рядок та останній стовпець — стану з кратними помилками, а решта пар рядок–стовпець — однократним помилкам. Наприклад, матриця з рис. 2 перетвориться на таку:

$$\begin{array}{c} \\ 1 \\ 0_1 \\ 0_2 \\ 0_3 \\ 0_\& \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} 1 & 0_1 & 0_2 & 0_3 & 0_\& \end{array} \\ \begin{bmatrix} P^1 & P^{0_1} & P^{0_2} & P^{0_3} & 0 \\ 0 & P^1+P^{0_1} & 0 & 0 & 1-P^1-P^{0_1} \\ 0 & 0 & P^1+P^{0_2} & 0 & 1-P^1-P^{0_2} \\ 0 & 0 & 0 & P^1+P^{0_3} & 1-P^1-P^{0_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}.$$

З цього прикладу видно, що ймовірність переходу $0_j \to 0_j$ дорівнює $P^1 + P^{0_j}$, а ймовірність переходу $0_j \to 0_\&$ дорівнює $1 - P^1 - P^{0_j}$, $j = \overline{1, m}$.

Об'єднання усіх кратних помилок в один тип забезпечує добрий баланс між складністю моделі та її адекватністю. Тому в подальшому застосовуватимемо саме цей стан АП.

Матричні моделі надійності за сумісних помилок

За ідею попереднього розділу про врахування сумісності помилок модифікуємо моделі з табл. 1. В результаті отримаємо такі матриці переходів операторів A, U, R, Z і E та логічної умови ω:

$$\mathbf{P}_A = \begin{bmatrix} P_A^1 & P_A^{0_1} & \dots & P_A^{0_m} & 0 \\ 0 & P_A^1 + P_A^{0_1} & \dots & 0 & 1-P_A^1-P_A^{0_1} \\ \vdots & & & & \\ 0 & 0 & \dots & P_A^1+P_A^{0_m} & 1-P_A^1-P_A^{0_m} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{P}_U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ V_U^{1_1} & V_U^{0_1} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \\ V_U^{1_m} & 0 & \dots & V_U^{0_m} & 0 \\ V_U^{1_\&} & 0 & \dots & 0 & V_U^{0_\&} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{P}_R = \begin{bmatrix} P_R^1 & P_R^{0_1} & \dots & P_R^{0_m} & 0 \\ V_R^{1_1} & V_R^{0_1} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \\ V_R^{1_m} & 0 & \dots & V_R^{0_m} & 0 \\ V_R^{1_\&} & 0 & \dots & 0 & V_R^{0_\&} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{P}_Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{P}_E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_\omega^1 = \begin{bmatrix} k_\omega^{11} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & k_\omega^{01_1} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & 0 & \dots & k_\omega^{01_m} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & k_\omega^{01_\&} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K}_\omega^0 = \begin{bmatrix} k_\omega^{10} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & k_\omega^{00_1} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & 0 & \dots & k_\omega^{00_m} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & k_\omega^{00_\&} \end{bmatrix}.$$

Моделі надійності алгоритмічних структур з табл. 2 залишаться правильними і при підстановці в них запропонованих в цьому розділі матриць переходів.

Ілюстративний приклад

Під час виконання робочих операторів A_1 та A_2 можуть бути внесені помилки двох суміжних типів з ймовірностями $P_{A_1}^{0_1} = 0,05$, $P_{A_1}^{0_2} = 0,15$, $P_{A_2}^{0_1} = 0,12$, $P_{A_2}^{0_2} = 0,04$. За цими даними розрахуємо надійність виконання структури $A_1 A_2$.

Матриці ймовірностей переходів операторів A_1 та A_2 є такими:

$$\mathbf{P}_{A_1} = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,05 & 0,15 & 0 \\ 0 & 0,85 & 0 & 0,15 \\ 0 & 0 & 0,95 & 0,05 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{та} \quad \mathbf{P}_{A_2} = \begin{bmatrix} 0,84 & 0,12 & 0,04 & 0 \\ 0 & 0,96 & 0 & 0,04 \\ 0 & 0 & 0,88 & 0,12 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрицю ймовірностей переходів структури $A_1 A_2$ розрахуємо за формулою $\mathbf{P}_{A_1 A_2} = \mathbf{P}_{A_1} \mathbf{P}_{A_2}$. Після підстановки числових значень, отримуємо:

$$\mathbf{P}_{A_1 A_2} = \begin{bmatrix} 0,672 & 0,144 & 0,164 & 0,02 \\ 0 & 0,816 & 0 & 0,184 \\ 0 & 0 & 0,836 & 0,164 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Звідси, $P_{A_1 A_2}^1 = 0,672$, $P_{A_1 A_2}^{0_1} = 0,144$, $P_{A_1 A_2}^{0_2} = 0,164$ та $P_{A_1 A_2}^{0_\&} = 0,02$, що збігається з результатами розрахунків за правилами теорії ймовірності.

Висновки

Аналізуючи надійність деяких АП, необхідно враховувати можливість внесення, виявлення та усунення помилок різних типів. Моделі надійності АП [12] розроблені з урахуванням несумісності помилок різних типів. В статті запропоновано ймовірнісні матричні моделі надійності операторів та логічних умов, які враховують можливість суміщення помилок різних типів. Встановлено, що моделі надійності алгоритмічних структур [12] залишаться правильними і при підстановці в них запропонованих матриць ймовірностей переходів операторів та логічних умов.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ротштейн А. П., Штовба С. Д. Нечеткая надежность алгоритмических процессов. — Винница: Континент-ПРИМ, 1997. — 142 с.
2. Ротштейн А. П., Штовба С. Д. Прогнозирование надежности алгоритмических процессов при нечетких исходных данных // Кибернетика и системный анализ. — 1998. — № 4. — С. 85—93.
3. Губинский А. И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. — Л.: Наука. — 1982. — 270 с.
4. Сафонов И. В. О формализованном надежностном анализе алгоритмических процессов // Управляющие системы и машины. — 1973. — № 6. — С. 92—95.
5. Бондарь Ю. В., Сафонов И. В. Об одном методе оптимального использования алгоритмической избыточности // Автоматика и вычислительная техника. — 1975. — № 3. — С. 26—29.
6. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, Проектирование, Испытания: Справочник / Адаменко А. Н., Губинский А. И., Ротштейн А. П. и др. — М.: Машиностроение, 1993. — 528 с.
7. Гвоздик М. И., Евграфов В. Г., Цой Е. Б. Оптимизация организационно-технических систем ВМФ. Методы. Алгоритмы. Программы. — СПб.: ВВМУРЭ, 1997. — 223 с.
8. Гриф М. Г., Цой Е. Б. Автоматизация проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем на основе метода последовательной оптимизации. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. — 264 с.
9. Ашеров А. Т. Сажко Г. І. Ергономіка інформаційних технологій: оцінка, проектування, експертиза. Навч. посіб. — Харків: УІПА, 2005. — 243 с.
10. Вигман Б. А. Стохастические модели контроля // Управляющие системы и машины. — 1973. — № 2. — С. 112—115.
11. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 480 с.
12. Ротштейн А. П., Кузнецов П. Д. Проектирование бездефектных человеко-машинных технологий. — К.: Техніка. — 1992. — 180 с.
13. Ротштейн А. П. Вероятностно-алгоритмические модели человеко-машинных систем // Автоматика. — 1987. — № 5. — С. 81—86.
14. Ротштейн А. П. Проектирование процессов функционирования человеко-машинных систем. — К.: Знание, 1987. — 19 с.
15. Вентцель Е. С. Исследование операций. — М.: Сов. радио, 1972. — 554 с.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних систем управління

Надійшла до редакції 10.06.07
Рекомендована до друку 30.06.07

Штовба Сергій Дмитрович — доцент кафедри комп'ютерних систем управління.
Вінницький національний технічний університет