УДК 519.248

Т. О. Стефанович[*], С. В. Щербовських[**]
Національний університет “Львівська політехніка”,
[*]кафедра проектування та експлуатації машин,
[**]кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань

МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПРИЧИН НЕПРАЦЕЗДАТНОСТІ СИСТЕМИ ІЗ НАВАНТАЖУВАЛЬНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ МІЖ ОДНОТИПНИМИ МОДУЛЯМИ

© Стефанович Т. О., Щербовських С. В., 2016

Запропоновано модель надійності системи із навантажувальним резервуванням елементів між однотипними модулями. Модель адекватно враховує вплив зміни навантаження резервованих елементів на ймовірнісні характеристики причин її непрацездатності. Для визначення надійності застосовані динамічне дерево відмов та марковська модель.

Ключові слова: модель надійності, причина непрацездатності, динамічне дерево відмов, марковська модель, навантажувальне резервування.

The reliability model for system with load-sharing redundancy of component between uniform modulus is proposed. The model adequately takes into account load-sharing impact of reserved components on failure cause probability characteristics of such system. For reliability determination a dynamic fault tree and a Markov model is used.

Key words: reliability model, failure cause, dynamical fault tree, Markov model, load-sharing redundancy.

Вступ. Постановка проблеми. Одним зі способів підвищення надійності технічних систем є застосування структурного резервування. Під час такого резервування у структуру системи вводять надлишкові елементи. Для багатьох механічних, гідравлічних та електротехнічних систем введення резервних елементів збільшує вартість системи, погіршує її масогабаритні та технічні показники. З економічного погляду це доволі часто нівелює ефект від підвищення показників надійності системи, що змушує проектантів шукати інші способи забезпечення надійності. Під час проектування систем, які складаються із однотипних модулів, з’являється корисна властивість, зміст якої полягає ось у чому. Якщо виникає непрацездатність одного із елементів модуля, то тимчасове функціонування цього модуля можна забезпечити за допомогою такого ж елемента, розміщеного у сусідньому модулі. Це знімає проблему підвищення вартості та масогабаритних показників системи, проте необхідно брати до уваги низку обмежень. По-перше, не для кожного елемента, розміщеного у сусідньому модулі, технічно можливо передати його функцію до основного модуля, в якому відповідний елемент непрацездатний. По-друге, якщо така можливість існує, то необхідно додати у систему сполучний елемент, який діагностуватиме потребу в такому передаванні та в разі необхідності його здійснюватиме. По-третє, якщо елемент у сусідньому модулі надає свою функцію одночасно в обидва модулі, то його навантаження зростає. У результаті постає проблема формування математичної моделі надійності, яка адекватно враховуватиме для системи, що складається із однотипних модулів, зміну навантаження для сполучного елемента та елемента сусіднього модуля, який резервує аналогічний елемент в основному модулі. Системи, складені із однотипних модулів, для яких реалізують такий спосіб підвищення надійності, використовуються у транспортній сфері, в системах військового призначення тощо.

Аналіз останніх досліджень. Для побудови моделей надійності систем, які складені із однотипних модулів, виділяємо такі підходи. У працях [1, 2] застосовують дерева відмов, які ґрунтуються на логіко-ймовірнісному методі. Недолік такого підходу полягає у тому, що він не забезпечує адекватного врахування явищ, пов'язаних зі зміною навантаження, а також не розрізняє катастрофічних і некатастрофічних відмов елементів. У працях [3, 4] використовують моделі надійності, які ґрунтуються на імітаційному моделюванні за методом Монте-Карло. Недоліком цього підходу є те, що одержані результати спотворені флуктуаціями, амплітуда яких для робочого діапазону параметрів співмірна зі значеннями досліджуваних характеристик. У працях [5, 6] використовують марковські моделі надійності, основані на аналізі простору станів. Основним недоліком таких моделей є обмеження експоненціальним розподілом, а також висока трудомісткість їх побудови.

Для вирішення поставленої проблеми використано підхід, який ґрунтується на поєднанні динамічних дерев відмов та марковських моделей надійності. Для послаблення обмеження експоненціальним розподілом застосовано розщеплення простору станів на основі тензорного аналізу [7–9], яке забезпечило урахування довільних розподілів і «запам'ятовування» передісторії напрацювання елементів системи за навантаженням.

У цій статті розв'язано такі завдання:

- математично описано надійність системи на основі динамічного дерева відмов;
- побудовано модель станів та подій і розщеплену однорідну марковську модель системи;
- визначено ймовірнісні характеристики причин непрацездатності системи.

Визначення характеристик надійності системи

Опис системи та її динамічне дерево відмов. В основному модулі 1 розміщено генератор G1, до якого підключено споживача M1 (рис. 1). Поруч із модулем 1 встановлено аналогічний модуль 2, в якому розміщено генератор G2, до якого під'єднано споживача M2. Між силовими лініями, які сполучають генератори зі споживачами, ввімкнено сполучний елемент SW.

Система функціонує так. Генератор G1 живить споживача M1, а генератор G2 — споживача M2, при цьому елемент SW перебуває у ненавантаженому режимі. Після відмови генератора G1 елемент SW діагностує його непрацездатність та подає до споживача M1 живлення від генератора G2 із сусіднього модуля. У результаті такого перемикання навантаження елемента SW стає номінальним, а навантаження генератора G2 зростає вдвічі. З метою спрощення моделі надійності у роботі прийнято такі припущення. Основний модуль не використовується для забезпечення працездатності сусіднього модуля. Це означає, що у випадку відмови генератора G2 елемент SW не подає живлення до споживача M2 від генератора G1. Сусідній модуль функціонує у найнавантаженішому режимі. Це означає, що генератор G2 перебуває весь час під навантаженням, незалежно від стану споживача M2.

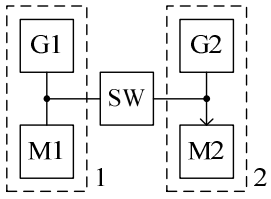


Рис. 1. Функціональна схема системи

Формалізуємо надійність системи динамічним деревом відмов, яке подано на рис. 2, *а*, а відповідна йому структурна схема надійності — на рис. 2, *б*. Динамічне дерево відмов є математичною моделлю, яка описує умову непрацездатності системи та умови зміни навантаження між її елементами на основі блоків, які позначають логічні операції та операції відношення. Непрацездатність системи позначена блоком «Вершина подій». Вважаємо, що така подія є катастрофічною, тобто поки вона не відбулась, ремонтування будь-якого елемента можна виконати стільки разів, скільки у цьому виникає потреба. Відновлений елемент за експлуатаційними характеристиками вважаємо аналогічним новому, а інші елементи системи такими, що мають попереднє напрацювання. Якщо настала відмова системи, то подальше ремонтування її елементів не розглядаємо. Непрацездатність системи спричиняє настання однієї із двох подій, що описує блок «Оператор 1», тип якого задано логічною операцією АБО.

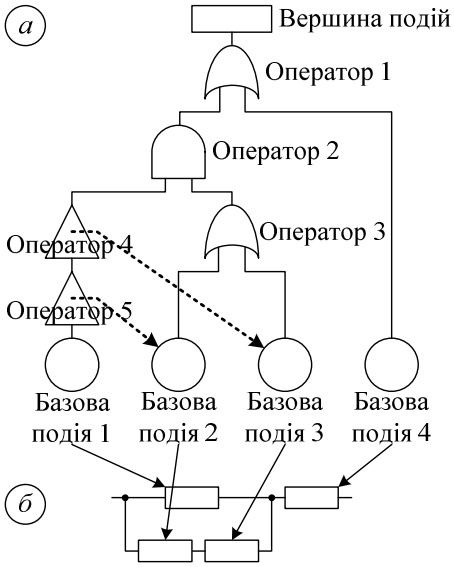


Рис. 2. Динамічне дерево відмов (а) та структурна схема надійності (б) системи

Перша подія настає у разі відмови споживача M1, що описує блок «Базова подія 4». Вважаємо, що напрацювання цього елемента розподілено за законом Вейбулла із параметрами α_4 і β_4. Друга подія відбувається внаслідок відмови генератора G1 та неможливості подати живлення від генератора G2, що описує блок «Оператор 2», тип якого задано логічною операцією І. Непрацездатність генератора G1, який розміщено в основному модулі, позначено блоком «Базова подія 1», а напрацювання до відмови такого елемента розподілено за законом Вейбулла із параметрами α_1 і β_1. Неможливість подати живлення від генератора G2 настає у разі відмови елемента SW або відмови генератора G2, що описує блок «Оператор 3», тип якого задано логічною операцією АБО. Непрацездатність сполучного елемента SW та генератора G2, розміщеного у сусідньому модулі, позначають блоки «Базова подія 2» і «Базова подія 3», а напрацювання до відмови цих елементів розподілено за законом Вейбулла із параметрами α_2 і β_2 та α_3 і β_3. Тривалість ремонтування елементів системи вважаємо розподіленою експоненціально із параметром μ. У системі відбуваються два динамічних процеси, які полягають у зміні навантаження елемента SW та генератора G2 залежно від стану генератора G1. Для опису цих процесів введемо у структуру динамічного дерева відмов блоки «Оператор 4» і «Оператор 5», які є повторювачами логічного сигналу, і задамо у них умови зміни навантаження. Зокрема, якщо на вхід блока «Оператор 4» подається логічний сигнал ХИБНО, тобто генератор G1 працездатний, то інтенсивність процесу напрацювання елемента SW, заданого блоком «Базова подія 3», дорівнює нулю. З іншого боку, якщо на вхід блока «Оператор 5» подається логічний сигнал ІСТИННО, тобто генератор G1 непрацездатний, то інтенсивність процесу напрацювання генератора G2, заданого блоком «Базова подія 2», збільшуємо в k_2 разів.

Модель станів та подій. На основі поданого вище динамічного дерева відмов системи згідно із формалізованими правилами [10] складено модель станів та подій. Така модель є математичним описом станів, в яких може перебувати система, та подій, які у ній можуть відбуваються, у проекційному зв'язку з процесами, що у ній здійснюються. Граф такої моделі подано на рис. 3, а її параметри у таблиці.

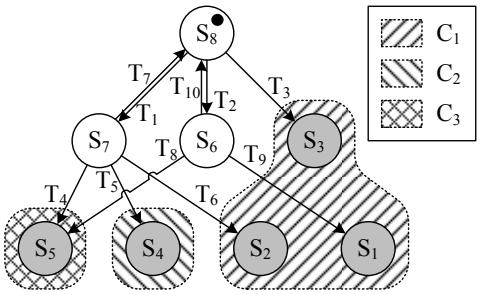
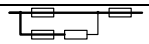
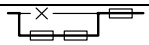
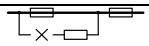
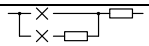
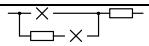
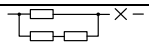
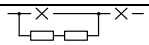
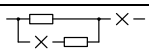


Рис. 3. Граф станів та переходів системи

У моделі станів та подій процес напрацювання для генератора G1 позначено як P_1, для генератора G2 – P_2, для елемента SW – P_3 та для споживача M1 – P_4. Процес ремонтування для генераторів G1 та G2 позначено P_5 та P_6 Відмова споживача M1 та елемента SW призводить одразу до катастрофічної відмови, тому ремонтування цих елементів не задаємо. На рис. 3 працездатні стани системи позначено колом, яке зафарбоване білим, а непрацездатні стани – сірим колом. Система перебуває у восьми станах, із яких три відповідають працездатності – S_6–S_8. Непрацездатні стани згруповано у три множини відповідно до причин відмови системи. Перша множина C_1 відповідає непрацездатності системи внаслідок відмови споживача M1. У цю множину входять стани S_1–S_3. Друга множина C_2 відповідає непрацездатності системи внаслідок відмови генератора G1 та елемента SW і містить лише один стан S_4, а третя множина C_3 – внаслідок відмови генераторів G1 та G2 і містить один стан S_5. У системі відбувається десять подій, із яких шість спричиняють катастрофічну відмову – T_3–T_6, T_8 і T_9.

Параметри моделі станів та подій системи

№	Опис станів									Опис подій		
	Поч. стан	Графічний опис стану	Коефіцієнти масштабування						y	Назва події	Заверш. процес	Кінц. стан
			P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6				
1	S_8		1	1	0	1	0	0	1	T_1	P_1	S_7
2										T_2	P_2	S_6
3										T_3	P_4	S_3
4	S_7		0	k_2	1	1	1	0	1	T_4	P_2	S_5
5										T_5	P_3	S_4
6										T_6	P_4	S_2
7										T_7	P_5	S_8
8	S_6		1	0	0	1	0	1	1	T_8	P_1	S_5
9										T_9	P_4	S_1
10										T_{10}	P_6	S_8
11	S_5		0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
12	S_4		0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
13	S_3		0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
14	S_2		0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
15	S_1		0	0	0	0	0	0	0	—	—	—

Параметрами станів є значення коефіцієнтів масштабування для процесів P_1–P_6 та логічна функція *y*, яка набуває значення «1», якщо система працездатна, та «0» — якщо ні. Параметрами подій є назва початкового стану, назва процесу, який завершився, та назва кінцевого стану.

Марковська модель. Ґрунтуючись на моделі станів та подій системи, згідно із формалізованими правилами [9], сформовано розщеплену однорідну марковську модель. Така модель є множиною матриць, які задають інтенсивності переходів між фазами **A**, початкові ймовірності фаз **p**(0), а також зв'язок **C** функцій ймовірності фаз **p**(*t*) із характеристиками надійності **y**(*t*) системи. Марковську модель подають системою диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{p}(t) = \mathbf{A}\,\mathbf{p}(t),$$
$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\,\mathbf{p}(t).$$

Для досліджуваної системи марковська модель подана у виразі:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} & & & & & \mathbf{A}_{T_9} & & \\ & & & & & & \mathbf{A}_{T_6} & \\ & & & & & & & \mathbf{A}_{T_3} \\ & & & & & & \mathbf{A}_{T_5} & \\ & & & & & \mathbf{A}_{T_8} & \mathbf{A}_{T_4} & \\ & & & & & \mathbf{A}_{S_6} & & \mathbf{A}_{T_2} \\ & & & & & & \mathbf{A}_{S_7} & \mathbf{A}_{T_1} \\ & & & & & \mathbf{A}_{T_{10}} & \mathbf{A}_{T_7} & \mathbf{A}_{S_8} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}(0) = \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \mathbf{p}_{S_8}(0) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{I} & & & & & \\ & & & \mathbf{I} & & & & \\ & & & & \mathbf{I} & & & \end{bmatrix}.$$

Компоненти марковської моделі системи формуємо на основі допоміжних марковських моделей процесів її елементів. Параметри марковських моделей процесів визначаємо згідно із критерієм рівності першого і центрованого другого моментів фактичного розподілу процесу та його допоміжної марковської моделі. Вважаємо, що для процесу $P_1\{\alpha_1, \beta_1\}$ параметри його допоміжної марковської моделі становлять $\{\mathbf{A}_1, \mathbf{p}_1(0), \mathbf{C}_1\}$, для $P_2\{\alpha_2, \beta_2\}$ — $\{\mathbf{A}_2, \mathbf{p}_2(0), \mathbf{C}_2\}$, для $P_3\{\alpha_3, \beta_3\}$ — $\{\mathbf{A}_3, \mathbf{p}_3(0), \mathbf{C}_3\}$, для $P_4\{\alpha_4, \beta_4\}$ — $\{\mathbf{A}_4, \mathbf{p}_4(0), \mathbf{C}_4\}$, для $P_5\{\mu\}$ — $\{\mathbf{A}_5, \mathbf{p}_5(0), \mathbf{C}_5\}$ та для $P_6\{\mu\}$ — $\{\mathbf{A}_6, \mathbf{p}_6(0), \mathbf{C}_6\}$. Відповідно до вказаних параметрів компоненти марковської моделі усієї системи обчислено згідно із поданими нижче формулами, зокрема для працездатного стану S_8:

$$\mathbf{A}_{S_8} = \mathbf{A}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 + \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{A}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 +$$
$$+ \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{A}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6,$$
$$\mathbf{p}_{S_8}(0) = \mathbf{p}_1(0) \otimes \mathbf{p}_2(0) \otimes \mathbf{p}_3(0) \otimes \mathbf{p}_4(0) \otimes \mathbf{p}_5(0) \otimes \mathbf{p}_6(0),$$

де $\otimes$ — оператор тензорного множення; $\mathbf{E}_1$–$\mathbf{E}_6$ — одиничні матриці, розмірність яких дорівнює розмірності матриць $\mathbf{A}_1$–$\mathbf{A}_6$.

Для працездатного стану S_7:

$$\mathbf{A}_{S_7} = k_2\, \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{A}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 + \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{A}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 +$$
$$+ \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{A}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 + \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{A}_5 \otimes \mathbf{E}_6.$$

Для працездатного стану S_6:

$$\mathbf{A}_{S_3} = \mathbf{A}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 + \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{A}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 +$$
$$+ \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{A}_6.$$

Для подій T_1 та T_8, спричинених завершенням процесу P_1:

$$\mathbf{A}_{T_1} = \mathbf{A}_{T_8} = \mathbf{p}_1\mathbf{C}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6.$$

Для подій T_2 та T_4, спричинених завершенням процесу P_2:

$$\mathbf{A}_{T_2} = \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{p}_2\mathbf{C}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6, \quad \mathbf{A}_{T_4} = k_2\, \mathbf{A}_{T_2}.$$

Для події T_5, спричиненої завершенням процесу P_3:

$$\mathbf{A}_{T_5} = \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{p}_3\mathbf{C}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6.$$

Для подій T_3, T_6 та T_9 спричинених завершенням процесу P_4:

$$\mathbf{A}_{T_3} = \mathbf{A}_{T_6} = \mathbf{A}_{T_9} = \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{p}_4\mathbf{C}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6.$$

Для події T_7, спричиненої завершенням процесу P_5:

$$\mathbf{A}_{T_7} = \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{p}_5\mathbf{C}_5 \otimes \mathbf{E}_6.$$

Для події T_{10}, спричиненої завершенням процесу P_6:

$$\mathbf{A}_{T_{10}} = \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{p}_6\mathbf{C}_6.$$

У матриці $\mathbf{C}$ одиничний вектор-рядок $\mathbf{I}$ має розмірність, яка дорівнює добутку розмірностей усіх матриць інтенсивності переходів $\mathbf{A}_1$–$\mathbf{A}_6$. Цю матрицю складено так, щоб три її рядки відповідали ймовірнісним характеристикам причин непрацездатності системи C_1–C_3. Одержана модель містить 128 рівнянь.

Ймовірнісні характеристики системи. Значення параметрів для елементів системи взято такими: $\alpha_1 = \alpha_2 = 3\,000$ год, $\beta_1 = \beta_2 = 1.2$; $\alpha_3 = 1000$ год, $\beta_3 = 1.3$; $\alpha_4 = 50\,000$ год, $\beta_4 = 1.1$, інтенсивність відновлення $\mu = 0.02$ 1/год. На основі розщепленої однорідної марковської моделі обчислено ймовірнісні характеристики причин непрацездатності системи. На рис. 4 подано сім'ю кривих ймовірнісних характеристик для різних значень коефіцієнта k_2. Цей коефіцієнт вказує, наскільки зростає інтенсивність зношування генератора G2 у перевантаженому режимі порівняно із номінальним. Цей коефіцієнт може набувати значень у межах від 1 до ∞. Значення 1 означає, що навантаження генератора G2 не зростає, а ∞ — зростає настільки, що це спричиняє миттєву відмову.

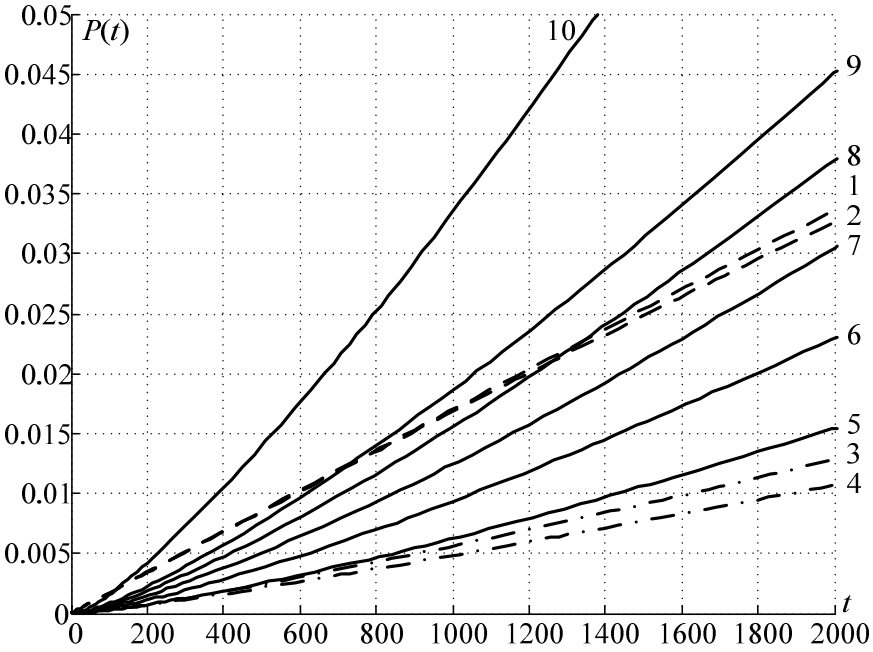


Рис. 4. Криві ймовірнісних характеристик причин непрацездатності системи

З інженерної практики відомо, що цей коефіцієнт набуває значень із діапазону від 1 до 10, дослідження якого виконано в роботі. Зауважимо, що ця модель залишатиметься адекватною і для значень $k_2 > 10$. Штрихові криві 1 і 2 відповідають ймовірностям непрацездатності системи внаслідок причини C_1, за якої споживач M1 непрацездатний. Штрихпунктирні криві 3 і 4 – ймовірностям непрацездатності системи внаслідок причини C_2, за якої генератор G1 та елемент SW непрацездатні, а суцільні криві 5–10 – з причини C_3, за якої непрацездатні генератори G1 та G2. Криві 1, 3 та 5 відповідають значенню $k_2 = 1$; криві 2, 4 та 10 – $k_2 = 10$; крива 6 – $k_2 = 2$, крива 7 – $k_2 = 3$, крива 8 – $k_2 = 4$, а крива 9 – $k_2 = 5$.

Як видно із рис. 4, зі збільшенням коефіцієнта k_2 у досліджуваних межах ймовірнісні характеристики непрацездатності системи внаслідок причин C_1 та C_2 зменшуються у діапазонах, обмежених кривими 1 і 2 та кривими 3 і 4. З іншого боку, ймовірнісні характеристики непрацездатності системи внаслідок причини C_3 інтенсивно зростають у діапазоні, обмеженому кривими 5 і 10. Це означає, що залежно від значення коефіцієнта k_2 та досліджуваного часового інтервалу відносний внесок причин непрацездатності змінюється. Зокрема, для напрацювання 2000 год та для $k_2 = \{1, 2, 3\}$ головною причиною непрацездатності є C_1, для $k_2 = \{4, 5, 10\}$ на перше місце виходить причина непрацездатності C_3. Для напрацювання 1000 год описана вище тенденція зберігається, окрім значення $k_2 = 4$, за якого причина непрацездатності C_1 домінує над C_3.

Одержана марковська модель досліджуваної системи є жорсткою. Така властивість моделі зумовлена розкидом параметрів процесів напрацювання та ремонтування, особливістю методу розщеплення простору станів та впливом коефіцієнта k_2.

Висновки. Розроблено математичну модель надійності системи із навантажувальним резервуванням елементів для однотипних модулів. Одержана модель призначена для кількісного аналізу причин непрацездатності такої системи. Надійність системи математично описано динамічним деревом відмов, в якому задано логічні умови зміни навантаження генератора у сусідньому модулі та сполучного елемента залежно від стану генератора в основному модулі. Ймовірнісні характеристики системи визначено за марковською моделлю, в якій на основі тензорних виразів розщеплення простору станів враховано вплив перерозподілу навантаження між елементами системи, тривалість напрацювання до відмови яких розподілена за законом Вейбулла. За допомогою такої моделі проаналізовано, як впливає зміна навантаження генератора у сусідньому модулі після

відмови генератора передусім через причини непрацездатності системи. Кількісно показано, що зі збільшенням навантаження непрацездатність системи унаслідок відмови обох генераторів із другорядної причини стає домінуючою. Кількісний аналіз такої властивості системи не можна адекватно виконати ні на основі застосування логіко-ймовірнісного аналізу, ні з використанням звичайної однорідної марковської моделі надійності.

Подальші дослідження скеровані на розроблення моделі надійності системи, в якій враховано, що до моменту настання відмови генератора в основному модулі елемент, який сполучає основний та сусідній модулі, перебуває не у холодному, а у полегшеному режимі функціонування.

1. Vega M. Algorithm to evaluate substation reliability with cut and path sets / M. Vega, H. G. Sarmiento // Industry Applications, IEEE Transactions on. – 2008. – Vol. 44, No. 6. – P. 1851–1858. 2. Wei-Chang Yeh. A new algorithm for generating minimal cut sets in k-out-of-n networks / Wei-Chang Yeh // Reliability Engineering & System Safety. – 2006. – Vol. 91, No. 1. – P. 36–43. 3. Khanh Nguyen T. P. Method for evaluating an extended Fault Tree to analyse the dependability of complex systems: Application to a Satellite-based railway system / T. P. Khanh Nguyen, Julie Beugina, Juliette Marais // Reliability Engineering & System Safety. – 2015. – Vol. 133. – P. 300–313. 4. Zhu P. A stochastic approach for the analysis of dynamic fault trees with spare gates under probabilistic common cause failures / P. Zhu, J. Han, L. Liu, F. Lombardi // Reliability, IEEE Transactions on. – Vol. 64, No. 3. – P. 878–892. 5. Manno G. Conception of Repairable Dynamic Fault Trees and resolution by the use of RAATSS, a Matlab® toolbox based on the ATS formalism / G. Manno, F. Chiacchio, L. Compagno, D. D'Urso, N. Trapani // Reliability Engineering &System Safety. – 2014. – Vol. 121, No. 1. – P. 250–262. 6. Daniele Codetta-Raiteri. Integrating several formalisms in order to increase Fault Trees' modeling power / Daniele Codetta-Raiteri // Reliability Engineering & System Safety. – 2011. – Vol. 96, No. 5. – P. 534–544. 7. Shcherbovskykh S. Failure intensity determination for system with standby doubling / S. Shcherbovskykh, O. Lozynsky, Ya. Marushchak // Przeglad Elektrotechniczny. – 2011. – Vol. 87, No. 5. – P. 160–162. 8. Mandziy B. Mathematical model for failure cause analysis of electrical systems with load-sharing redundancy of component / B. Mandziy, O. Lozynsky, S. Shcherbovskykh // Przeglad Elektrotechniczny. – 2013. – Vol. 89, No. 11. – P. 244–247. 9. Stefanovych T. The reliability model for failure cause analysis of pressure vessel protective fittings with taking into account load-sharing effect between valves / T. Stefanovych, S. Shcherbovskykh, P. Droździel // Diagnostyka. – 2015. – Vol. 16, No. 4. – P. 17–24. 10. Щербовських С. В. Математичні моделі та методи для визначення характеристик надійності багатотермінальних систем із урахуванням перерозподілу навантаження: монографія / С. В. Щербовських. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 296 с.