



ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТА ФУНКЦІЙНОЇ БЕЗПЕЧНОСТІ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Л. Озірковський, Б. Матіїв, Н. Приймак

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Відповідальний за рукопис Леонід Озірковський (leonid.d.ozirkovskyi@lpnu.ua)

Наведено результати дослідження впливу засобів контролю та діагностики на значення показників надійності та функційної безпечності відмовостійких систем передавання інформації. Дослідження полягало у моделюванні декількох варіантів відмовостійкої системи передавання інформації. Як метод моделювання застосовано удосконалений метод простору станів з автоматизованою побудовою графу станів та переходів. На основі отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо вибору показників надійності засобів контролю та діагностики, щоб забезпечити мінімальне зменшення надійності відмовостійкої системи передавання інформації.

Ключові слова: надійність; надійнісне проєктування; функційна безпечність; показники надійності; відмовостійкі системи; засоби контролю та діагностики; метод простору станів; марковська модель.

УДК 629.039.58, 621.396.9

1. Вступ

Особливістю відмовостійких систем передавання інформації (ВСПІ) є наявність різних видів надлишковості: часової, інформаційної, програмної (алгоритмічної), функціональної чи структурної [1, 2]. У багатьох випадках ВСПІ містять декілька різновидів надлишковості [3, 4]. Для керування надлишковим ресурсом необхідно мати сукупність додаткових технічних засобів. Ці засоби повинні виявляти сам факт появи несправності, встановлювати різновид несправності (відмова чи збій), визначати наявність та стан резерву (працездатний чи непрацездатний) та успішність його підключення до основної конфігурації відмовостійкої системи [5]. Такі додаткові технічні засоби називають засобами контролю та діагностики.

Засоби контролю та діагностики (ЗКД) входять до складу ВСПІ як окремі технічні засоби. З одного боку, вони дають змогу виявляти і класифікувати різновид несправності, поліпшуючи цим властивість виявлення порушень працездатності (*Detection*). Поліпшення властивості *Detection* призводить до зменшення коефіцієнта ризику (*Risk Priority Number* – RPN) [6, 7], а це підвищує функційну безпечність ВСПІ. З іншого боку, ЗКД є окремими технічними засобами, а отже, з погляду надійності, вони послідовно з'єднані з іншими підсистемами ВСПІ. А за послідовного з'єднання окремих модулів ймовірність безвідмовної роботи зменшується [8]. Отже, введення ЗКД до складу ВСПІ зменшує їх надійність.

Тому актуальним є кількісне дослідження впливу на показники надійності та функційної безпечності ВСПІ введення до їх складу засобів контролю та діагностики, а саме того, які показники надійності повинні мати ЗКД, щоб їх вплив на надійність ВСПІ був мінімальним [9].

2. Сучасні підходи до оцінювання надійності та функційної безпечності відмовостійких систем

Дослідження впливу ЗКД на показники надійності та функційної безпечності можна здійснити за допомогою натурних випробувань [10]. Для цього потрібно взяти декілька сотень ВСПІ та експлуатувати їх доволі довго – 15000–20000 год. У результаті експлуатації буде отримана статистика відмов як ВСПІ, так і ЗКД. Опрацювавши ці дані, отримують кількісні значення показників надійності та функційної безпечності. Аналізуючи їх, визначають вплив ЗКД на показники надійності та функційної безпечності ВСПІ.

Такий підхід гарантує високі точність вхідних даних та достовірність отриманих результатів, однак часові затрати – декілька років. Зважаючи на сучасний бурхливий розвиток програмно-апаратних платформ, такий підхід неприйнятний, бо за час проведення натурних випробувань можуть змінитись декілька поколінь апаратного забезпечення та декілька версій програмного забезпечення. Це зводить нанівець усі переваги такого підходу.

Тому визначати вплив ЗКД на показники надійності та функційної безпечності сучасних ВСПІ доцільно за допомогою моделювання.

Показники надійності та функційної безпечності відмовостійких систем визначають за допомогою низки методів моделювання, найчастіше використовують структурні схеми надійності, метод простору станів та дерева відмов. Структурні схеми надійності є простим та добре відпрацьованим методом, який дає змогу в повному обсязі врахувати всі особливості структури відмовостійкої системи [1, 8]. Однак такий підхід не дає змоги врахувати поведінку відмовостійкої системи у разі виходу з ладу її підсистем чи модулів, процедури здійснення контролю та діагностики, правила підключення резерву тощо. Крім цього, такий метод не дає змоги оцінити показники функційної безпечності.

Для визначення показників безпечності використовують метод дерев відмов, який дає змогу отримати мінімальні перерізи [11, 12], які можна одержати і за допомогою бінарних діаграм рішень. Цей метод можна використовувати і для отримання показників надійності [13], однак моделі у вигляді дерев відмов для оцінювання показників надійності та безпечності будуть абсолютно різними і не дають змоги визначити кореляцію між зміною надійності та безпечності.

Метод простору станів дає змогу адекватно врахувати як структуру, так і поведінку відмовостійкої системи [14]. Ступінь деталізації моделі визначається кількістю компонент вектора станів і обмежується розмірністю фазового простору одержаного графу станів і переходів. Метод простору станів з низкою вдосконалень [15, 16] придатний для оцінювання показників функційної безпечності, таких як мінімальні перерізи та частота потрапляння в аварійну ситуацію. Істотна перевага цього методу – те, що для визначення як показників надійності, так і функційної безпечності будують єдину модель. Однак за детального опису відмовостійкої системи кількість станів може сягати від декількох десятків до декількох тисяч, що істотно обмежує застосування цього підходу за ручної побудови графу станів і переходів.

У [17] запропоновано підхід до автоматизованої побудови графу станів та переходів на основі структурно-автоматної моделі. Структурно-автоматна модель – це формалізоване представлення об'єкта моделювання, у цьому випадку ВСПІ, у вигляді трьох множин даних. Перша множина – це набір констант, які характеризують структуру ВСПІ й основні технічні параметри його складових. Цю множину називають множиною формальних параметрів. Друга множина – вектор станів. Це набір змінних, за допомогою яких здійснюють кодування станів. Ці змінні показують, як змінюються технічні параметри складових ВСПІ під час переходу засобу з одного стану в інший. Всі можливі значення компонент вектора станів формують сукупність усіх можливих станів. Третя множина – дерево правил модифікацій, яке описує поведінку ВСПІ за порушень працездатності його складових. Дерево правил модифікації подають у вигляді таблиці, в якій відображають усі можливі події, які можуть статись з ВСПІ, умови, за яких ці події можуть виконатися, і наслідки, до яких кожна з подій призводить. Цей підхід реалізовано у вигляді програмного забезпечення ASNA [18]. Вхідними даними для програмного забезпечення ASNA є структурно-автоматна модель, а результатом роботи – перелік усіх можливих станів ВСПІ та матриця інтенсивностей переходів.

З огляду на переваги та недоліки описаних вище методів, для подальших досліджень вибрано удосконалений метод простору із автоматизованою побудовою графу станів і переходів.

3. Побудова структурно-автоматної моделі відмовостійкої системи передавання інформації з вбудованими засобами контролю та діагностики

Для дослідження впливу засобів контролю та діагностики на показники надійності та безпечності як ВСПІ вибрано відмовостійкий телевізійний передавач R&S@NH/NV8600 [19] виробництва фірми Rohde&Schwarz. Вихідний каскад цього передатчика складається з десяти підсилювачів потужності R&S@VH8600A1 UHF amplifier. В основній робочій конфігурації використано сім підсилювачів потужності, а три підсилювачі в кожному холодному резерві. Щоб передатчик виконував свої функції, працездатними повинні бути чотири модулі. Тобто із семи модулів три в гарячому резерві з перерозподілом навантаження. Як ЗКД використано модуль R&S@NetCCU@800 transmitter control unit.

Першим етапом побудови моделі ВСПІ з урахуванням ЗКД у вигляді графу станів і переходів, згідно із методом [17], є побудова структурно-автоматної моделі об'єкта дослідження. Для побудови структурно-автоматної моделі необхідно сформулювати множину формальних параметрів, вибрати структуру та сформулювати компоненти вектора станів і побудувати дерево правил модифікації компонент вектора станів.

Формування множини формальних параметрів

Множина формальних параметрів повинна містити дані, які описують структуру ВСПІ та параметри кожного із елементів цієї структури. До таких даних належать:

1. Кількість основних модулів відмовостійкої ВСПІ, $N = 7$.
2. Кількість резервних модулів, $R = 3$.
3. Інтенсивність відмов основних модулів, $L = 1,7 \times 10^{-4} \text{ год}^{-1}$.
4. Інтенсивність відмов резервних модулів, $Lr = 4,2 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$.
5. Інтенсивність відмов ЗКД, $Lz = 5,3 \times 10^{-6} \text{ год}^{-1}$.
6. Ймовірність спрацювання ЗКД, $Pz = 0,995$.

Формування компонент вектора станів

Структура ВСПІ під час функціонування змінюється унаслідок втрати працездатності окремих модулів, заміни основних модулів, які втратили працездатність, резервними. Крім цього, ЗКД також можуть виходити з ладу, що призводить до втрати працездатності усієї ВСПІ.

Для визначення кількісних значень показників надійності та безпечності ВСПІ потрібно знати, скільки справних модулів основної конфігурації та резервних модулів є у кожен момент часу, в якому стані засоби контролю та діагностики. Тому вектор станів повинен мати три компоненти:

- V1 – кількість справних модулів основної конфігурації;
- V2 – кількість справних резервних модулів;
- V3 – стан ЗКД; 1 – ЗКД працездатні; 0 – ЗКД – непрацездатні.

Формування дерева правил модифікації

Поведінка ВСПІ, у формалізованому поданні, визначається подіями, які призводять до змін значень компонент вектора станів. Для формування дерева правил модифікації компонент вектора станів потрібно встановити базові події, які відбуваються з ВСПІ, з погляду надійності, умови, за яких ці події відбуваються і до яких наслідків це призводить. Події є базовими, якщо вони призводять до переходу ВСПІ в інший стан [17].

Перелік базових подій для досліджуваної ВСПІ:

1. Вихід із ладу модуля основної конфігурації.
2. Вихід із ладу резервного модуля.
3. Вихід із ладу ЗКД.

Перша подія може відбутися за умови, що справний хоча б один основний модуль. Кількість справних основних модулів відображає значення компоненти V1 вектора станів. Тобто умова, за

якої ця подія відбудеться: $V1 > 0$, передбачає дві обставини: за наявності резерву наслідком цієї події буде зменшення загальної кількості резервних модулів: $V2 := V2 - 1$. Якщо резерв вичерпується, то в разі виходу з ладу наслідком цієї події буде зменшення загальної кількості основних модулів: $V1 := V1 - 1$.

Друга подія може відбутися за умови, що справний хоча б один резервний модуль. Кількість справних резервних модулів відображає значення компоненти $V2$ вектора станів. Тобто умова, за якої ця подія відбудеться: $V2 > 0$. Наслідком цієї події буде зменшення загальної кількості резервних модулів: $V2 := V2 - 1$.

Третя подія відбудеться за умови, що ЗКД є справними, тобто $V3 = 1$. Наслідком цієї події буде перехід ЗКД у несправний стан: $V3 := 0$. Сформоване дерево правил модифікації компонент вектора станів, яке відображає поведінку ВСПІ із ЗКД у разі втрати працездатності її складових, наведено в таблиці.

Дерево правил модифікації компонент вектора станів

Події	Умови та обставини	Формули розрахунку інтенсивностей переходу	Формули розрахунку ймовірностей альтернативних переходів	Правила модифікації компонент вектора станів
1. Вихід із ладу модуля основної конфігурації	$(V1 > 0) \text{ AND } (V2 > 0)$	$V1 * L$	1	$V2 := V2 - 1$
	$(V1 > 0) \text{ AND } (V2 = 0)$	$V1 * L$	1	$V1 := V1 - 1$
2. Вихід з ладу резервного модуля	$V2 > 0$	$V2 * L$	1	$V2 := V2 - 1$
3. Вихід з ладу ЗКД	$V3 = 1$	Lz	1	$V3 = 0$
Умова відмови: $(V1 < 4) \text{ OR } (V3 = 0)$				

4. Визначення впливу засобів контролю та діагностики на показники надійності та безпечності системи передавання інформації

Визначення показників надійності відмовостійкої системи передавання інформації за умови, що засоби контролю та діагностики абсолютно надійні

У переважній більшості підходів до оцінювання надійності ВСПІ вважають, що надійність ЗКД є абсолютною і ймовірність їх безвідмовної роботи становить $R_{зкд}(t) = 1$ [20]. Тому спочатку виконують оцінювання надійності ВСПІ за умови, що ЗКД абсолютно надійні.

Для оцінювання показників надійності ВСПІ із абсолютно надійними ЗКД використано програмне забезпечення ASNA, вхідними даними для якого є структурно-автоматна модель. Ця модель відрізнятиметься від моделі, наведеної в попередньому пункті, тим, що компонент вектора станів буде тільки дві – $V1$ та $V2$, а дерево правил модифікації (див. таблицю) не міститиме події 3.

Після запуску цього програмного забезпечення отримаємо перелік усіх станів та матрицю інтенсивностей переходів, відповідно до якої побудовано граф станів і переходів, наведений на рис. 3.

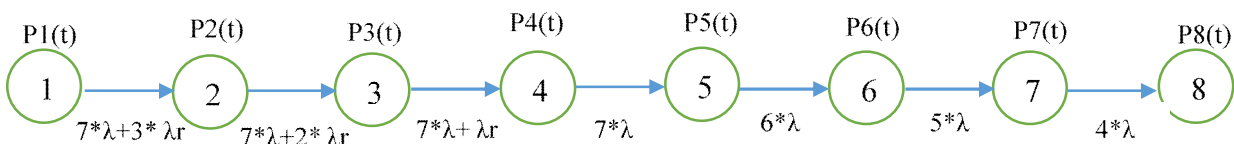


Рис. 1. Граф станів і переходів

На основі графу станів і переходів (рис. 1) сформовано аналітичну математичну модель ВСПІ з абсолютно надійними ЗКД у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена (1), в результаті розв’язання якої отримаємо розподіл ймовірностей перебування ВСПІ у

кожному зі станів. Розв'язання системи рівнянь (3) здійснено числовим методом Рунге – Кутти – Мерсона, який реалізовано в програмному забезпеченні ASNA.

$$\begin{aligned} \frac{dP1(t)}{dt} &= -(7 \cdot \lambda + 3 \cdot \lambda r) \cdot P1(t) \\ \frac{dP2(t)}{dt} &= -(7 \cdot \lambda + 3 \cdot \lambda r) \cdot P1(t) - (7 \cdot \lambda + 2 \cdot \lambda r) \cdot P2(t) \\ \frac{dP3(t)}{dt} &= (7 \cdot \lambda + 2 \cdot \lambda r) \cdot P2(t) - (7 \cdot \lambda + 2 \cdot \lambda r) \cdot P3(t) \\ \frac{dP4(t)}{dt} &= (7 \cdot \lambda + 2 \cdot \lambda r) \cdot P3(t) - 7 \cdot \lambda \cdot P4(t) \\ \frac{dP5(t)}{dt} &= 7 \cdot \lambda \cdot P4(t) - 6 \cdot \lambda \cdot P5(t) \\ \frac{dP6(t)}{dt} &= 6 \cdot \lambda \cdot P5(t) - 5 \cdot \lambda \cdot P6(t) \\ \frac{dP7(t)}{dt} &= 5 \cdot \lambda \cdot P6(t) - 4 \cdot \lambda \cdot P7(t) \\ \frac{dP8(t)}{dt} &= 4 \cdot \lambda \cdot P7(t) \end{aligned} \quad (1)$$

На підставі отриманого розподілу ймовірностей сформовано показники надійності ВСПІ з абсолютно надійними ЗКД. Ймовірність безвідмовної роботи отримано як суму ймовірностей перебування у працездатних станах (а це стани від $P1(t)$ до $P7(t)$):

$$R(t) = \sum_{i=1}^7 P_i(t). \quad (2)$$

Разом з тим, програмне забезпечення ASNA обчислює середній час роботи ВСПІ до відмови MTTF (Mean Time To Fault):

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt. \quad (3)$$

Залежність ймовірності безвідмовної роботи від тривалості експлуатації ВСПІ та середній час роботи до відмови, отримані за допомогою програмного забезпечення ASNA, подано на рис. 2.

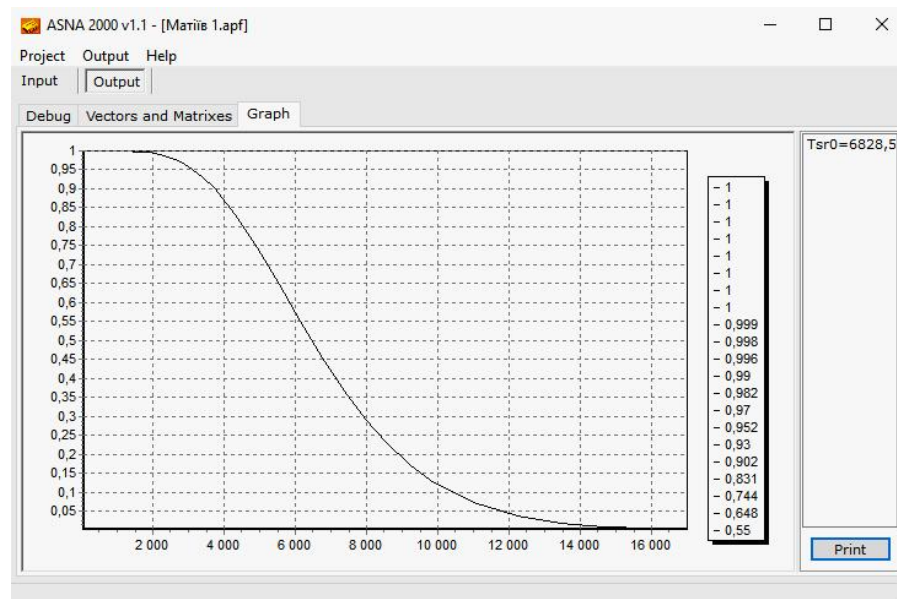


Рис. 2. Залежність ймовірності безвідмовної роботи ВСПІ від тривалості експлуатації та середній час роботи до відмови

Дослідження показників надійності відмовостійкої системи передавання інформації за умови, що засоби контролю та діагностики можуть відмовляти

Надійність реальних ВСПІ засобів контролю та діагностики скінченна, що сильно впливає на надійність ВСПІ загалом [20]. Тому необхідно визначити ступінь цього впливу та визначити, за яких показників надійності ЗКД їх вплив на загальні показники надійності ВСПІ буде мінімальним.

Для цього дослідження використано структурно-автоматну модель, наведену в п. 2. В результаті роботи програмного забезпечення ASNA отримано перелік станів та матрицю інтенсивностей переходів, подану на рис. 3.

Vector	P	To	From	Intensity
V1=7; V2=3; V3=1	1	1	1	-0,0013213
V1=7; V2=2; V3=1	0	2	1	0,001316
V1=7; V2=1; V3=1	0	8	1	5,3E-6
V1=7; V2=0; V3=1	0	2	2	-0,0012793
V1=6; V2=0; V3=1	0	3	2	0,001274
V1=5; V2=0; V3=1	0	8	2	5,3E-6
V1=4; V2=0; V3=1	0	3	3	-0,0012373
	0	4	3	0,001232
	0	8	3	5,3E-6
	0	4	4	-0,0011953
	0	5	4	0,00119
	0	8	4	5,3E-6
	0	5	5	-0,0010253
	0	6	5	0,00102
	0	8	5	5,3E-6
	0	6	6	-0,0008553
	0	7	6	0,00085
	0	8	6	5,3E-6
	0	7	7	-0,0006853
	0	8	7	0,0006853

Рис. 3. Перелік усіх станів та значення компонент вектора станів та матриця інтенсивностей переходів

Згідно із отриманою матрицею інтенсивностей переходів (рис. 3) побудовано граф станів і переходів, поданий на рис. 4.

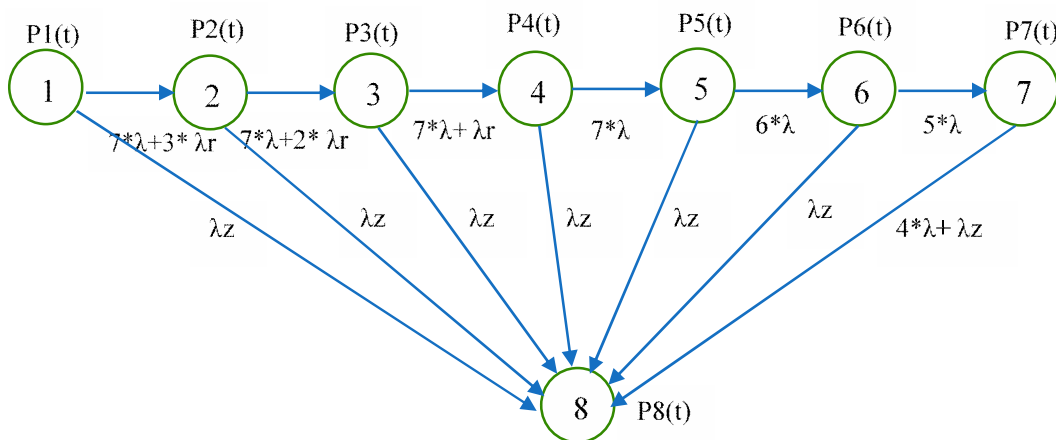


Рис. 4. Граф станів і переходів ВСПІ з урахуванням ненадійних ЗКД

На основі отриманого графу станів і переходів сформовано систему диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена (4), на основі якої одержано розподіл ймовірностей перебування ВСПІ в усіх станах з урахуванням ненадійних ЗКД.

$$\begin{aligned} \frac{dP1(t)}{dt} &= -(7 \cdot \lambda + 3 \cdot \lambda r + \lambda z) \cdot P1(t) \\ \frac{dP2(t)}{dt} &= -(7 \cdot \lambda + 3 \cdot \lambda r) \cdot P1(t) - (7 \cdot \lambda + 2 \cdot \lambda r + \lambda z) \cdot P2(t) \\ \frac{dP3(t)}{dt} &= (7 \cdot \lambda + 2 \cdot \lambda r) \cdot P2(t) - (7 \cdot \lambda + 2 \cdot \lambda r + \lambda z) \cdot P3(t) \\ \frac{dP4(t)}{dt} &= (7 \cdot \lambda + 2 \cdot \lambda r) \cdot P3(t) - (7 \cdot \lambda + \lambda z) \cdot P4(t) \\ \frac{dP5(t)}{dt} &= 7 \cdot \lambda \cdot P4(t) - (6 \cdot \lambda + \lambda z) \cdot P5(t) \\ \frac{dP6(t)}{dt} &= 6 \cdot \lambda \cdot P5(t) - (5 \cdot \lambda + \lambda z) \cdot P6(t) \\ \frac{dP7(t)}{dt} &= 5 \cdot \lambda \cdot P6(t) - (4 \cdot \lambda + \lambda z) \cdot P7(t) \\ \frac{dP8(t)}{dt} &= 4 \cdot \lambda \cdot P7(t) - \lambda z \cdot P8(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Показники надійності формуються аналогічно, як і в (2) та (3). Залежності ймовірності безвідмовної роботи від часу за різних значень показників надійності ЗКД наведено на рис. 5.

Базовим значенням інтенсивності відмов ЗКД вибрано $\lambda z = 0,000052 \text{ год}^{-1}$, тобто надійність ЗКД співмірна із надійністю основних модулів ВСПІ. Дослідження виконано для трьох варіантів реалізації ВСПІ з ЗКД, за умови, що надійність кожного наступного варіанта ЗКД на порядок більша, ніж попереднього варіанта, тобто $\lambda z = 0,000052 \text{ год}^{-1}$, $\lambda z = 0,00000052 \text{ год}^{-1}$ та $\lambda z = 0,000000052 \text{ год}^{-1}$.

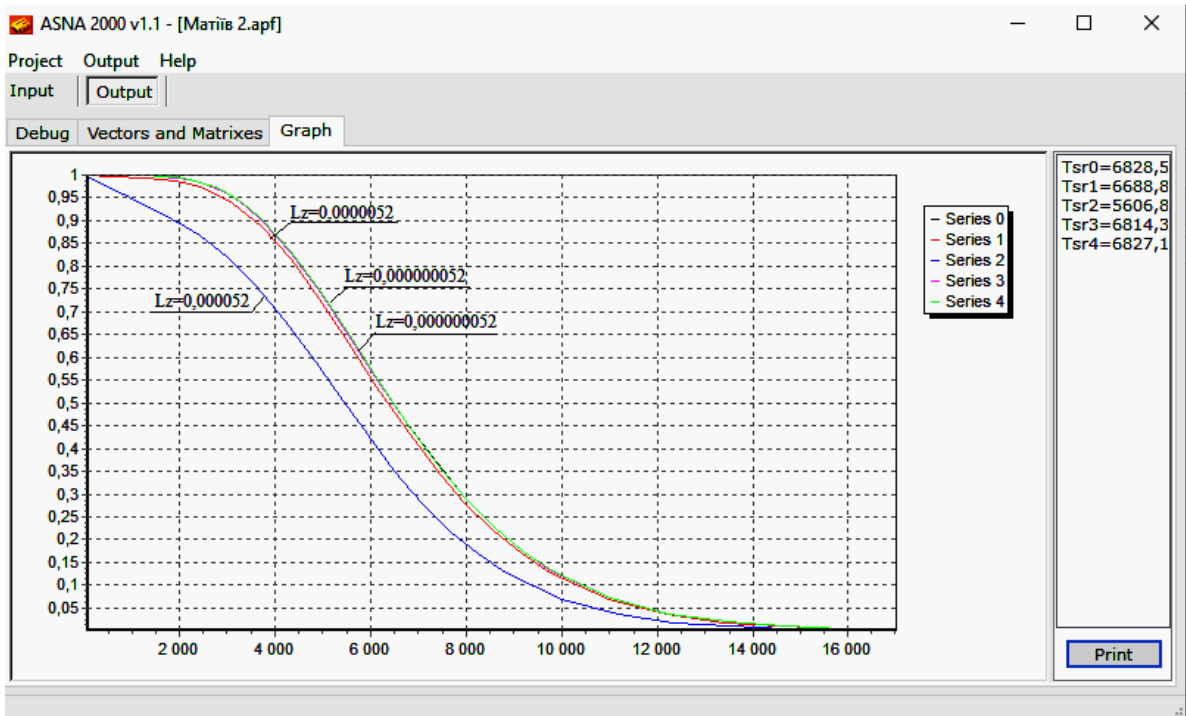


Рис. 5. Залежність ймовірності безвідмовної роботи від тривалості експлуатації ВСПІ з урахуванням ненадійних ЗКД

З отриманих результатів (рис. 5) можна зробити такі висновки:

1. Якщо надійність (інтенсивність відмов) ЗКД співмірна з надійністю модулів ВСПІ, то загальна надійність ВСПІ істотно зменшується (крива з $Lz = 0,000052$) порівняно з випадком, коли ЗКД є абсолютно надійними. Інтервал часу, впродовж якого ймовірність безвідмовної роботи забезпечується на рівні 0,9, зменшується із 3800 год до 2000 год. Це зменшення становить 48 %, а це неприйнятно для систем відповідального призначення. А на рівні 0,95 це зменшення ще істотніше: з 3500 до 900 год, що становить 4 %. На рівні 0,99 зменшення інтервалу роботи становить 96 % (230 год і 2000 год відповідно. Середній час роботи до відмови зменшується на 18 % з 6828 год до 5606 год.

2. Якщо надійність (інтенсивність відмов) ЗКД на порядок вища, ніж надійність модулів ВСПІ, то загальна надійність ВСПІ зменшується значно менше (крива з $Lz = 0,000052$). Інтервал часу, протягом якого ймовірність безвідмовної роботи забезпечується на рівні 0,9 зменшується з 3800 год до 3600 год. Це зменшення становить 5 %, і для систем відповідального призначення не є критичним. А на рівні 0,95 воно ще менше: з 3500 до 3400 год, що становить 2,9 %. На рівні 0,99 зменшення інтервалу роботи становить 2,4 % (1950 год і 2000 год відповідно). Середній час роботи до відмови зменшується на 2 % з 6828 год до 6688 год.

3. Якщо надійність (інтенсивність відмов) ЗКД на два порядки вища, ніж надійність модулів ВСПІ, то загальна надійність ВСПІ практично не змінюється (крива з $Lz = 0,0000052$). Відхилення на рівні 0,9 становить 1,1 %, а на рівнях 0,95 та 0,99 менше ніж 5 %. Середній час роботи до відмови зменшується на 0,03 % з 6828 год до 6814 год.

4. Якщо надійність (інтенсивність відмов) ЗКД на три порядки вища, ніж надійність модулів ВСПІ, то загальна надійність ВСПІ знижується менше ніж на 0,05 % (крива з $Lz = 0,00000052$), а середній час роботи з 6828 до 6827.

4. Дослідження показників безпечності відмовостійкої системи передавання інформації за умови, що засоби контролю та діагностики можуть відмовляти

Показниками безпечності ВСПІ є мінімальні перерізи (MCS), ймовірність настання аварійної ситуації (Q), частота потрапляння в аварійну ситуацію $W(t)$ та коефіцієнт ризику (RPN) [7, 11, 15]. За допомогою моделі у вигляді графу станів і переходів можна визначити частоту потрапляння в аварійну ситуацію $W(t)$ та мінімальні перерізи [15]. У роботі здійснено дослідження частоти потрапляння ВСПІ в аварійну ситуацію залежно від рівня надійності ЗКД.

Частота потрапляння ВСПІ в аварійну ситуацію $W(t)$ – це сума усіх переходів із працездатних станів у непрацездатний (рис. 5) і кількісно визначається як сума добутків інтенсивностей переходів у непрацездатний стан із працездатних на ймовірності перебування у працездатних станах (5):

$$W(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \sum_{q=0}^{z-1} \lambda_{z,z-q} \cdot P_q(t), \quad (5)$$

де $\lambda_{z,z-q}$ – інтенсивність переходу в непрацездатний стан z з працездатного стану q ; $P_q(t)$ – ймовірність перебування ВСПІ в працездатному стані q ; $Q(t)$ – ймовірність потрапляння ВСПІ в непрацездатний стан z .

Згідно із (5) частота потрапляння ВСПІ в аварійну ситуацію $W(t)$ – це сума добутків інтенсивностей переходу із працездатного стану в непрацездатний, помножена на ймовірність перебування в працездатному стані, в нашому випадку матиме вигляд:

$$W(t) = \lambda z \cdot P_1(t) + \lambda z \cdot P_2(t) + \lambda z \cdot P_3(t) + \lambda z \cdot P_4(t) + \lambda z \cdot P_5(t) + \lambda z \cdot P_6(t) + (4 \cdot \lambda + \lambda z) \cdot P_7(t).$$

Отже, за результатами досліджень (рис. 6) можна зробити такі висновки.

1. Якщо інтенсивність відмов ЗКД співмірна з інтенсивністю відмов основних модулів ВСПІ, то в момент часу $t = 0$ частота потрапляння в аварійну ситуацію $W(t)$ становить $4,8 \cdot 10^{-5}$, що зменшує властивість відмовостійкості, оскільки за відсутності ЗКД частота потрапляння в аварійну ситуацію відмовостійкого ВСПІ дорівнює нулю.

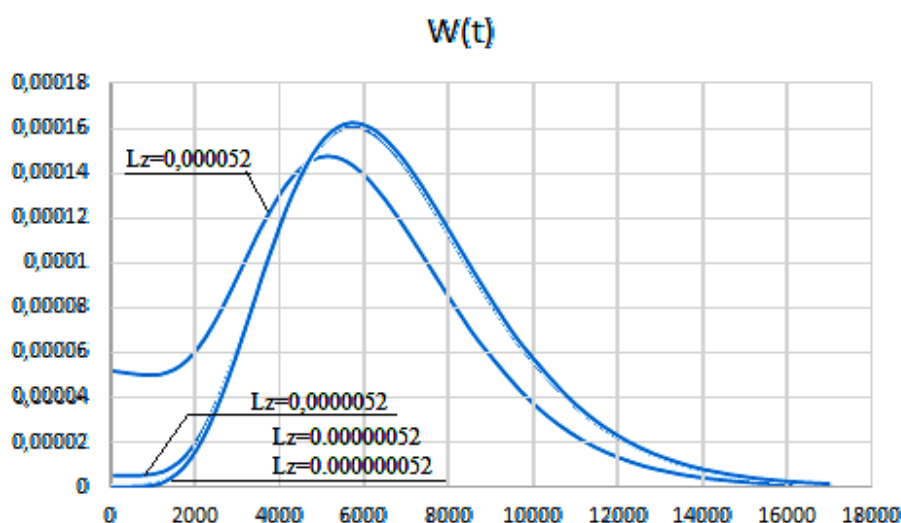


Рис. 6. Залежність $W(t)$ за різних значень інтенсивності відмов ЗКД

2. Зі збільшенням надійності ЗКД (зменшення інтенсивності відмов на порядок) частота потрапляння в аварійну ситуацію $W(t)$ зменшується до $3,8 \cdot 10^{-6}$, що прийнятно для більшості різновидів ВСПІ.

3. Із подальшим збільшенням надійності ЗКД (зменшення інтенсивності відмов на два порядки) частота потрапляння в аварійну ситуацію $W(t)$ зменшується до $4,1 \cdot 10^{-7}$, що дає змогу використовувати такі ВСПІ як системи відповідального призначення.

4. Подальше збільшення надійності ЗКД недоцільне, оскільки $W(t)$ зменшується до $4,05 \cdot 10^{-8}$, а вартість таких систем зростає більш ніж на порядок.

Висновки

1. Засоби контролю та діагностування входять до складу відмовостійких систем як обов'язковий елемент і призначені для реалізації процедур виявлення порушень працездатності окремих модулів, встановлення модуля, який втратив працездатність, визначення різновиду порушення працездатності та для відключення несправного і підключення резервного модуля.

2. Засоби контролю та діагностики дають змогу реалізувати властивість відмовостійкості ВСПІ, з одного боку, та підвищити функційну безпечність, з іншого.

3. Введення у структуру ВСПІ засобів контролю та діагностики призводить до зниження рівня надійності відмовостійкої системи за рахунок того, що ЗКД мають скінченну надійність і підключені, з погляду надійності, послідовно до ВСПІ.

а. Якщо інтенсивність відмов ЗКД на три порядки вища, ніж інтенсивності відмов модулів ВСПІ, то у цьому випадку ЗКД можна вважати ідеальними і прийняти, що їх ймовірність безвідмовної роботи дорівнює одиниці. Однак з погляду практики це збільшує на порядок і більше вартість таких ЗКД.

б. Для ВСПІ відповідального призначення (авіація, військова техніка, атомна енергетика) доцільно вибирати ЗКД, інтенсивність відмов яких буде на два порядки вищою, ніж інтенсивність відмов модулів ВСПІ. У такому разі ціна буде нижчою, ніж у попередньому випадку, а надійність ЗКД можна вважати практично ідеальною.

с. Для відмовостійких ВСПІ доцільно вибирати ЗКД із показниками надійності (інтенсивність відмов), що на порядок перевищують інтенсивність відмов модулів ВСПІ. Зниження показників надійності у такому разі не перевищує 5 %, що не є критичним, а ціна ЗКД буде меншою в разі, порівняно з попередніми випадками.

4. Якщо інтенсивність відмов ЗКД хоча б на порядок менша за інтенсивність відмов основних модулів ВСП, то це, з одного боку, практично не зменшує властивість відмовостійкості, а з іншого – істотно зменшує коефіцієнт ризику RPN. Подальше збільшення надійності ЗКД доцільне тільки у випадку, якщо ВСП використовується як система відповідального призначення в авіації, атомній енергетиці тощо, оскільки вартість таких систем зростає більш ніж на порядок.

5. Із підвищенням надійності ЗКД зменшується ймовірність потрапляння ВСП в аварійну ситуацію, що збільшує функційну безпечність відмовостійкої системи загалом.

Список використаних джерел

- [1] Koren, I., Mani Krishna, C. (2020). *Fault-Tolerant Systems, Second Edition, Morgan Kaufmann*. 416 p.
- [2] Nørnvåg, Kjetil (2012). *An Introduction to Fault-Tolerant Systems*, Department of Computer and Information Science Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway. 21 p.
- [3] Ouyang, Y., Wang, Q., Li, Z., Liang, H., Li, J. (2021). "Fault-tolerant design for data efficient retransmission in WiNoC", in *Tsinghua Science and Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 85–94.
- [4] Zhou, Q., Zhao, T., Chen, X., Zhong, Y., Luo, H. (2022). *A Fault-Tolerant Transmission Scheme in SDN-Based Industrial IoT (IIoT) over Fiber-Wireless Networks*. *Entropy* 2022, 24, 157.
- [5] Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki, M. (2016) *Diagnosis and Fault-tolerant Control*. 3rd Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 715 p.
- [6] Stamatis, D. (2019). *Risk Management Using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*. ASQ Quality Press, 118 p.
- [7] *Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA) IEC 60812*.
- [8] Rausand M. (2014) *Reliability of Safety-Critical Systems: Theory and Applications*. John Wiley & Sons, 466 p.
- [9] Матіїв Б. В. (керівник – Л. Д. Озірковський) (2022). Оцінювання впливу засобів контролю та діагностики на показники надійності та безпечності відмовостійких програмно-апаратних радіоелектронних засобів: бакалаврська кваліфікаційна робота. Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2022. 75 с.
- [10] Berk, M., Schubert, O., Kroll, H., Buschardt, B., & Straub, D. (2019). *Reliability Assessment of Safety-Critical Sensor Information: Does One Need a Reference Truth?* *IEEE Transactions on Reliability*, 68, pp. 1227–1241.
- [11] Henley, E., Kumamoto, H. (2000). *Probabilistic Risk Assessment: Reliability Engineering, Design and Analysis*. Wiley-IEEE Press, 2-nd ed.
- [12] *Minimal cut set analysis. Appendix D. Guide-lines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Second Edition by Center for Chemical Process Safety (2010)*. American Institute of Chemical Engineers
- [13] Kvassay, M., Kostolny, M. "Minimal Cut Sets and Path Sets in Binary Decision Diagrams and logical differential calculus", *The 10th International Conference on Digital Technologies*, 9–11 July 2014, Zilina, Slovakia.
- [14] Cui, L., Frenkel, I., Lisnianski A. (2020). *Stochastic Models in Reliability Engineering*, CRC Press, 478 p.
- [15] Ozirkovskyy, L., Volochiy, B., Shkiliuk, O., Zmysnyi, M., Kazan, P.(2022). "Functional Safety Analysis Of Safety-Critical System Using State Transition Diagram", *Radioelectronic and Computer Systems*, 2022(2), pp. 145–158.
- [16] Volochiy, B., Ozirkovskyy, L. (2018). "Method of developing unified model for estimating safety and reliability of complex systems for critical application", *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018*, pp. 801–804.
- [17] Бобало, Ю., Волочій, Б., Лозинський, О., Мандзій, Б., Озірковський, Л., Федасюк, Д., Щербовських, С., Яковина В. (2013). *Математичні моделі та методи для аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем: монографія*. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013. 300 с.
- [18] Volochiy, B., Mandziy, B., Ozirkovskyy, L. (2012). "Extending The Features of Software For Reliability Analysis of Fault-tolerant Systems". *Computational Problems of Electrical Engineering, Lviv Politechnic National University*, Vol. 2, No. 1, pp. 113–121.
- [19] R&S®/NH/NV8600 UHF Transmitter Family for TV High power – low consumption. *Data Sheet 2.0*. <http://www.unlimitech.com/uploads/5/0/2/7/50276885/rs-nv8600.pdf>
- [20] Рижов, С., Сакович, Л., Глухов, С., Настішин, Ю. (2021). Оцінка впливу діагностичного забезпечення на надійність радіоелектронних систем, *Військово-техн. збірник*, (24), С. 3–8.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MAINTENANCE STRATEGY PARAMETERS ON THE ACCIDENT RATE OF THE MOBILE COMMUNICATION SYSTEM

L. Ozirkovskyy, B. Matiiv, N. Pryimak

Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

The article presents the results of the study of the influence of monitoring and diagnostic means on the values of reliability and functional safety indicators of fault-tolerant information transmission systems. The study was carried out by modeling several variants of a fault-tolerant information transmission system. As a modeling method, an improved state transition diagram with automated construction of a graph of states and transitions is used. On the basis of the obtained results, recommendations for the selection of reliability indicators of control and diagnostic means are formulated to ensure a minimum reduction in the reliability of a fault-tolerant information transmission system.

Key words: *reliability; reliability engineering; functional safety; reliability indicators; fault-tolerant systems; monitoring and diagnostic means; state transition diagram; Markov model.*