



РАДІОЕЛЕКТРОНІКА

<https://doi.org/10.23939/ict2024.01.070>

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗАСОБІВ ПІДКЛЮЧЕННЯ РЕЗЕРВУ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

Л. Озірковський [ORCID: 0000-0003-0012-2908], В. Пабіривський [ORCID: 0000-0002-6071-3817],

С. Микицький, Н. Величко, Н. Приймак, Ю. Жук

Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

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

(Подано 1 лютого 2024 р.)

Для забезпечення заданих показників надійності до складу сучасних систем передавання даних вводять структурну надлишковість. Структурна надлишковість надає системі властивість відмовостійкості, суттєво підвищує її надійність. Для керування надлишковим ресурсом необхідно мати додаткові засоби, які будуть під'єднувати резервне обладнання до основної конфігурації системи передавання даних. Засоби під'єднання резерву є окремими технічними засобами і з точки зору надійності, вони послідовно з'єднані з іншими модулями системи передавання даних. Отже, введення засобів під'єднання резерву до складу системи передавання даних зменшує її надійність. Крім того, засоби під'єднання резерву, навіть у разі ідеальної надійності, можуть не спрацювати або спрацювати неправильно і за певних умов спричинити вихід із ладу системи передавання даних. Для визначення впливу засобів під'єднання резерву на показники надійності системи передавання в статті застосовано оригінальну технологію побудови моделей дискретно-неперервних стохастичних систем. Як програмний засіб для моделювання надійності поведінки системи передавання даних використано програмне забезпечення ASNA. Це програмне забезпечення забезпечує автоматизовану побудову моделі як графа станів і переходів на основі структурно-автоматної моделі. На основі графу станів та переходів автоматично формується аналітична модель у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена. За допомогою розробленої моделі в статті проведено кількісний аналіз впливу засобів під'єднання резерву (комутаторів) на показники надійності системи передавання даних. Під час дослідження у запропонованих моделях на відміну від існуючих враховувалися як показники надійності (ймовірність безвідмовної роботи), так і показники функційності (ймовірність спрацювання, швидкодія) засобів під'єднання резерву. На основі розробленої моделі визначено граничні показники надійності та функційності засобів підключення резерву (комутаторів), за яких вони будуть мінімально зменшувати показники надійності відмовостійкої системи передавання даних. На основі аналізу отриманих результатів сформовано практичні рекомендації до вибору показників надійності засобів під'єднання резерву, їхньої швидкодії та ймовірності спрацювання.

Ключові слова: надійність, надійнісне проектування, відмовостійка система, засоби підключення резерву, система передавання даних, показники надійності, метод простору станів, марковська модель

УДК: 629.039.58, 621.396.9

1. Вступ

Сучасні системи передавання даних будують із властивістю відмовостійкості. Для керування надлишковим ресурсом, а саме вимкнення обладнання непрацездатних каналів зв'язку чи увімкнення резервних необхідно мати сукупність додаткових технічних засобів, які повинні під'єднати резервне обладнання до основної конфігурації системи передавання даних. Такі додаткові технічні засоби називаються засобами увімкнення резерву або засобами комутації (комутаторами) [1–2].

Засоби увімкнення резерву (засоби комутації) входять до складу систем передавання даних як окремі технічні засоби. З одного боку, вони дають змогу відімкнути підсистему чи модуль, який вийшов з ладу, і замість нього увімкнути резервний модуль, у такий спосіб забезпечуючи властивість відмовостійкості. Підвищення відмовостійкості дає змогу збільшити середній час роботи до відмови (MTTF – Mean Time To Failure), а це своєю чергою підвищує надійність системи передавання даних. З іншого боку, засоби увімкнення резерву є окремими технічними засобами, а значить, з точки зору надійності, вони послідовно з'єднані з іншими модулями системи передавання даних. А при послідовному з'єднанні окремих модулів імовірність безвідмовної роботи системи зменшується [1–4]. Отже, введення засобів під'єднання резерву до складу системи передавання даних зменшує її надійність. Крім того, засоби увімкнення резерву, навіть у разі ідеальної надійності, можуть не спрацювати або спрацювати неправильно і за певних умов спричинити вихід з ладу системи передавання даних.

Тож необхідно провести дослідження впливу засобів під'єднання резерву, а саме визначення граничних показників їхньої надійності, за яких вони мінімально впливають на показники надійності системи передавання даних [5], бо неправильно обрані засоби комутації можуть знизити показники надійності резервованої системи навіть порівняно з нерезерованою.

2. Різновиди засобів увімкнення резерву, які використовують у системах передавання даних

Дискретний комутатор. Як засоби під'єднання активного резерву використовують дискретні комутатори. Вони є ефективними під час під'єднання цілих систем, підсистем чи пристроїв, однак рідко використовуються для під'єднання окремих модулів чи блоків. Це пояснюється тим, що для кожного резервного модуля пристрою потрібен окремий комутатор, що суттєво ускладнює конструкцію і відчутно зменшує надійність пристрою. Наприклад, дискретні комутатори ефективні у разі під'єднання резервної системи живлення. Типову структуру такого комутатора наведено в [6].

Матричний комутатор. Матричні комутатори як засоби під'єднання резерву знайшли широке застосування в програмно-апаратних системах, зокрема мікропроцесорних системах на чіпі [7], у радіоелектронних системах передавання даних із резервованими передавачами [8], у резервованих системах передавання аудіо- та відеосигналів [9] із гарячим резервуванням модулів обробки сигналу, в телекомунікаційних системах [10] для під'єднання резервних модемів, концентраторів та комутаторів, які можуть працювати як в гарячому, так і в холодному резерві. Широке застосування матричних комутаторів пояснюється їхньою високою швидкістю, незначними перехідними процесами між каналами, широким частотним діапазоном, можливістю реалізації у вигляді інтегральних схем. Типову структуру матричного комутатора наведено в [7; 9]. Матриця комутації може мати N входів і N виходів та забезпечує можливості комутації будь-якого входу на кожен із виходів.

Глобальна мережа комутації. Якщо говорити про галузь телекомунікацій та глобальних комп'ютерних мереж зокрема та розподілених і хмарних систем загалом, то на сьогодні стають популярними засоби під'єднання резерву у вигляді глобальної комутаційної мережі [11]. Їх широко використовують для комутації джерел інформації від супутників. Така глобальна мережа містить сукупність матричних комутаторів, рознесених територіально, але віртуально вони формують єдиний комутаційний простір. Прикладом такої комутаційної мережі може бути обладнання

супутникової наземної станції XTREME 80, яка містить лінійку розподілених матричних комутаторів L-діапазону Quintech і забезпечує гнучку платформу для розподілу супутникового сигналу. Тож об'єктом дослідження буде матричний комутатор як засіб під'єднання резерву, а предметом дослідження – показники надійності відмовостійкої системи передавання даних.

3. Визначення впливу засобів під'єднання резерву на показники надійності системи передавання даних

Для визначення впливу засобів під'єднання резерву (комутації) на показники надійності системи передавання даних буде застосована технологія побудови моделей дискретно-неперервних стохастичних систем [12]. Як програмний засіб для моделювання експлуатаційної поведінки системи передавання даних обрано програмне забезпечення ASNA [13]. Це програмне забезпечення передбачає автоматизовану побудову моделі у вигляді графа станів і переходів. На основі графу станів та переходів формується аналітична модель у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена. Граф станів і переходів та система рівнянь будуються автоматизовано на основі структурно-автоматної моделі.

3.1. Побудова структурно-автоматної моделі

Структурно-автоматна модель містить три множини даних [12]:

- множину формальних параметрів – показує початковий варіант структури системи;
- вектор станів – показує як змінюється структура у разі відмови складових системи та у разі під'єднання резерву;
- дерево правил модифікації – показує поведінку системи при порушенні працездатності окремих підсистем та модулів.

Формування множини формальних параметрів. Множина формальних параметрів містить дані, що описують структуру системи передавання даних, а саме:

1. Кількість основних каналів зв'язку, N .
2. Кількість резервних каналів зв'язку, R .
3. Інтенсивність відмов основного каналу зв'язку, L_0 .
4. Інтенсивність відмов резервного каналу зв'язку, L_r .
5. Інтенсивність виходу з комутатора L_k .
6. Ймовірність правильного спрацювання комутатора P_k .

Формування компонент вектора станів. Під час функціонування, в результаті відмов каналу зв'язку та комутатора, система передавання даних змінює свою структуру. Зміни структури системи відображає змінна – вектор станів. В ній змінюються значення компонент вектора станів, які в кожен момент часу показують скільки справних каналів зв'язку та резервних каналів зв'язку є в наявності, в якому стані знаходяться комутатор тощо.

Тож у нашому випадку вектор станів має три компоненти:

V1 – поточна кількість справних основних каналів зв'язку;

V2 – поточна кількість справних резервних каналів зв'язку;

V3 – стан комутатора: комутатор справний – 1, комутатор не справний – 0.

Початкове значення вектора стану на момент часу $t=0$ буде мати вигляд: $N, R, 1$.

Формування дерева правил модифікації. Для формування дерева правил модифікації компонент вектора станів потрібно спочатку встановити події, які можуть відбутися із системою передавання даних із точки зору надійності. Далі необхідно визначити умови, за яких ці події зможуть відбутися. Умовами є логічні вирази, аргументами яких є компоненти вектора станів. Кожна подія відбувається з різною швидкістю (є події миттєві, а є повільні) і система передавання

даних в одні стани потрапляє часто, а в інші – рідко. Тому кожній події ставиться у відповідність формула розрахунку інтенсивності переходу зі стану в стан. Певні події мають тільки один наслідок, а певні – декілька. Цю особливість поведінки системи передавання даних відображає компонент дерева правил модифікації – формула розрахунку ймовірності альтернативного переходу. Останнім компонентом дерева правил модифікації є правила модифікації компонент вектора станів. Цей компонент відображає наслідки, до яких призводить кожна подія, і відображається у зміні значень компонент вектора станів. Події називаються базовими, якщо вони призводять до переходу системи передавання даних в інший стан.

У нашому випадку перелік базових подій буде таким:

1. Вихід із ладу основного каналу зв'язку.
2. Вихід із ладу резервного каналу зв'язку.
3. Під'єднання резервного каналу зв'язку.
4. Відмова комутатора.

Перша подія – **вихід із ладу основного каналу зв'язку** – може відбутися за умови, що справним є хоча б один канал зв'язку. Умова, за якої ця подія відбудеться, є така: $V1 > 0$. Інтенсивність (швидкість) настання наслідку цієї події буде дорівнювати інтенсивності відмов основного каналу зв'язку, помноженій на поточну кількість справних каналів зв'язку: $V1 * L_0$. Альтернативних наслідків ця подія не має. Єдиним наслідком цієї події буде зменшення кількості основних каналів зв'язку на одиницю: $V1 := V1 - 1$.

Друга подія – **вихід із ладу резервного каналу зв'язку** – може відбутися за умови, що справним є хоча б один резервний канал зв'язку. Умова, настання цієї події буде: $V2 > 0$. Інтенсивність (швидкість) настання наслідку цієї події буде дорівнювати інтенсивності відмов резервного каналу зв'язку, помноженій на поточну кількість справних резервних каналів зв'язку: $V2 * L_r$. Альтернативних наслідків ця подія не має. Єдиним наслідком цієї події буде зменшення загальної кількості резервних каналів зв'язку на одиницю: $V2 := V2 - 1$.

Третя подія – **під'єднання резервного каналу зв'язку** – відбудеться за умови, що кількість основних каналів зв'язку є меншою від початкової, тобто $V1 < N$ і є хоча б один справний резервний канал зв'язку: $V2 > 0$. Отже, умовою виконання події «Під'єднання резервного каналу зв'язку» буде логічний вираз $(V1 < N) \text{ AND } (V2 > 0)$. Під час виконання цієї події повинен спрацювати комутатор. У цьому випадку комутатор може спрацювати з імовірністю P_k і резервний канал зв'язку увімкнеться замість несправного основного з інтенсивністю $\frac{1}{T_k}$, де T_k – час комутації (увімкнення) резервного каналу зв'язку до основної конфігурації. У цьому випадку кількість каналів зв'язку основної конфігурації збільшиться на одиницю $V1 := V1 + 1$, а кількість справних резервних каналів зв'язку зменшиться на одиницю: $V2 := V2 - 1$. Альтернативним наслідком цієї події буде неспрацювання комутатора. Ця альтернатива може трапитися з імовірністю $(1 - P_k)$, де P_k – імовірність правильного спрацювання (комутації) комутатора. Інтенсивність настання альтернативного наслідку – $\frac{1}{T_k}$, де T_k – час комутації (увімкнення) резервного каналу зв'язку до основної конфігурації. В цьому випадку кількість каналів зв'язку основної конфігурації не зміниться, а кількість справних резервних каналів зв'язку зменшиться на одиницю: $V2 := V2 - 1$.

Четверта подія – **відмова комутатора** – відбудеться за умови, що комутатор є справним: $V3 := 1$. Інтенсивність настання події буде дорівнювати інтенсивності відмов комутатора – L_k . Альтернативних наслідків ця подія не має. Єдиним наслідком буде переведення комутатора в несправний стан: $V3 := 0$. Під час виходу з ладу комутатора система передавання даних повністю втрачає працездатність.

Умовою відмови для відмовостійкої системи передавання даних буде логічний вираз: $(V1=0) \text{ OR } (V3=0)$. Це означає, що система передавання даних вийде з ладу в одному з двох випадків: або коли не залишиться справних основних каналів зв'язку: $V1=0$, або вийде з ладу комутатор: $V3=0$.

3.2. Дослідження показників надійності відмовостійкої системи передавання даних за умови, що засоби під'єднання резерву є ідеальними

Для визначення впливу на показники надійності відмовостійкої системи передавання даних засобів під'єднання резерву спочатку визначимо ці показники за умови, що комутатор із точки зору надійності є ідеальним, тобто ймовірність безвідмовної роботи становить: $R_k(t) = 1$, час комутації є безмежно малим: $T_k = 0$ і комутатор спрацьовує завжди правильно: $P_k = 1$. Ці показники надійності (ймовірність безвідмовної роботи $R(t)$ та МТТФ) системи передавання даних будемо вважати граничними потенційно досяжними показниками. Отримані показники з реальними параметрами комутатора і покажуть вплив засобів під'єднання резерву на надійність системи загалом.

Для цього в структурно-автоматній моделі вилучимо Подію 4. **Відмова комутатора**, а ймовірність спрацювання комутатора приймемо рівною 1 ($P_k = 1$). Компонентів вектора станів у такому разі буде дві: $V1$ – поточна кількість справних основних каналів зв'язку; $V2$ – поточна кількість справних резервних каналів зв'язку.

Згідно з отриманими даними, за допомогою програмного забезпечення ASNA, значень компонент вектора станів та матриці інтенсивностей переходів побудовано граф станів і переходів (рис. 1).

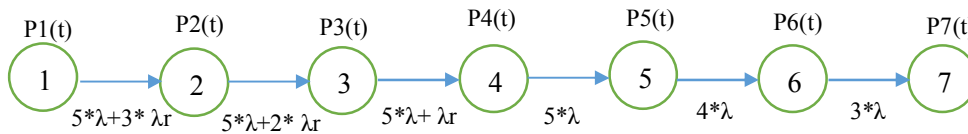


Рис. 1. Граф станів і переходів системи передавання даних із ідеальними засобами під'єднання резерву

На основі графу станів і переходів (рис. 1) сформовано систему лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена (1) із постійними коефіцієнтами. В результаті розв'язку цієї системи рівнянь отримаємо розподіл імовірностей $P1(t)$, $P2(t)$, $P3(t)$, $P4(t)$, $P5(t)$, $P6(t)$, $P7(t)$. На основі цього розподілу сформуємо вирази для визначення показників надійності системи передавання.

Система лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена вирішується чисельним методом Рунге-Кутта-Мерсона за допомогою програмного забезпечення ASNA:

$$\begin{aligned}
 \frac{dP1(t)}{dt} &= -(5\lambda + 3\lambda_z) * P1(t) \\
 \frac{dP2(t)}{dt} &= (5\lambda + 3\lambda_z) * P1(t) - (5\lambda + 2\lambda_z) * P2(t) \\
 \frac{dP3(t)}{dt} &= (5\lambda + 2\lambda_z) * P2(t) - (5\lambda + \lambda_z) * P3(t) \\
 \frac{dP4(t)}{dt} &= (5\lambda + \lambda_z) * P3(t) - (5\lambda) * P4(t) \\
 \frac{dP5(t)}{dt} &= (5\lambda) * P4(t) - (4\lambda) * P5(t) \\
 \frac{dP6(t)}{dt} &= (4\lambda) * P5(t) - (3\lambda) * P6(t) \\
 \frac{dP7(t)}{dt} &= (3\lambda) * P6(t)
 \end{aligned} \tag{1}$$

З отриманого розподілу ймовірностей ASNA сумує ймовірності перебування системи передавання даних у працездатних станах (а це стани від P1(t) до P6(t)) і формує залежність ймовірності безвідмовної роботи R(t) від тривалості експлуатації t:

$$R(t) = \sum_{i=1}^6 P_i(t). \quad (2)$$

Також згадане програмне забезпечення обчислює середній час роботи до відмови MTTF (Mean Time To Fault):

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

На рис. 2 представлено залежність ймовірності безвідмовної роботи системи передавання даних із ідеальним комутатором від тривалості експлуатації та середній час роботи до відмови.

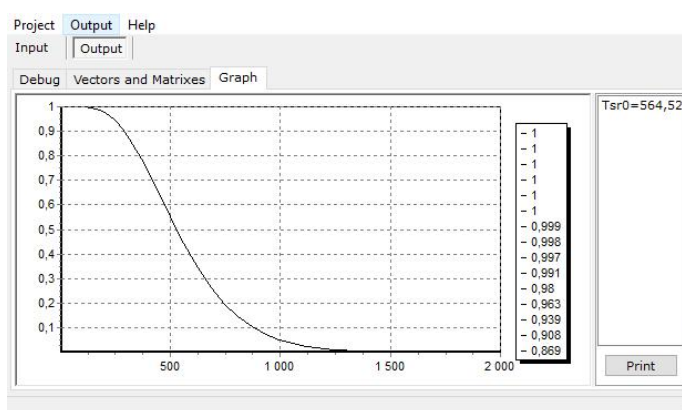


Рис. 2. Залежність ймовірності безвідмовної роботи системи передавання даних із ідеальним комутатором від тривалості експлуатації

3.3. Дослідження показників надійності відмовостійкої системи високошвидкісного даних із неідеальним комутатором

Як було сказано вище, у системах передавання даних засоби під'єднання резерву (комутатори) мають скінченну надійність, не завжди правильно спрацьовують та мають скінченну швидкість перемикавання. Ці чинники суттєво знижують надійність системи загалом. Тому необхідно визначити ступінь цього впливу та визначити, за яких показників надійності комутатора та за яких його функційних параметрів (ймовірність правильного спрацювання та середній час комутації) вплив на загальні показники надійності системи передавання даних будуть мінімальними.

Визначення впливу ненадійного комутатора з ідеальним правильним спрацюванням проводимо так. Спочатку дослідимо систему передавання даних із комутатором, який має неідеальні показники надійності: інтенсивність відмов є відмінною від нуля, а MTTF має скінченне значення. Будемо вважати, що цей комутатор завжди працює ідеально, а саме з ймовірністю, рівній одиниці, під'єднує резервні канали зв'язку до основної конфігурації системи передавання даних.

Для проведення досліджень використаємо структурно-автоматну модель. Згідно з отриманою матрицею інтенсивностей переходів будемо граф станів і переходів, який представлено на рис. 3.

Програмне забезпечення ASNA на основі побудованого графу станів і переходів формує систему диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, на основі якої визначає показники надійності системи передавання даних із урахуванням ненадійних засобів під'єднання резерву (комутатора). Показники надійності формуються з працездатних станів аналогічно, згідно з формулами (2) та (3). Непрацездатним є стан 13.

Для визначення впливу надійності комутатора на показники надійності системи передавання даних будемо змінювати інтенсивність відмов комутатора від $1,8 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ до $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$, і при цих значеннях будемо визначати ймовірність безвідмовної роботи та МТТФ системи передавання даних протягом періоду експлуатації. Залежність ймовірності безвідмовної роботи від часу експлуатації при різних значеннях інтенсивності відмов комутатора приведено на рис. 4. Залежність МТТФ від різних значень інтенсивності відмов комутатора приведено на рис. 5.

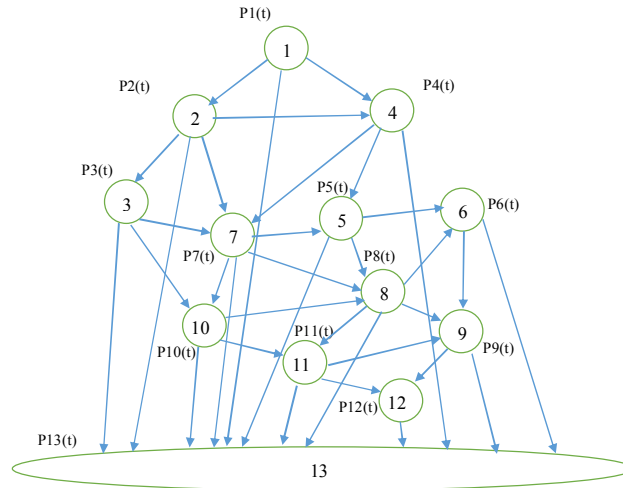


Рис. 3. Граф станів і переходів з урахуванням ненадійного комутатора

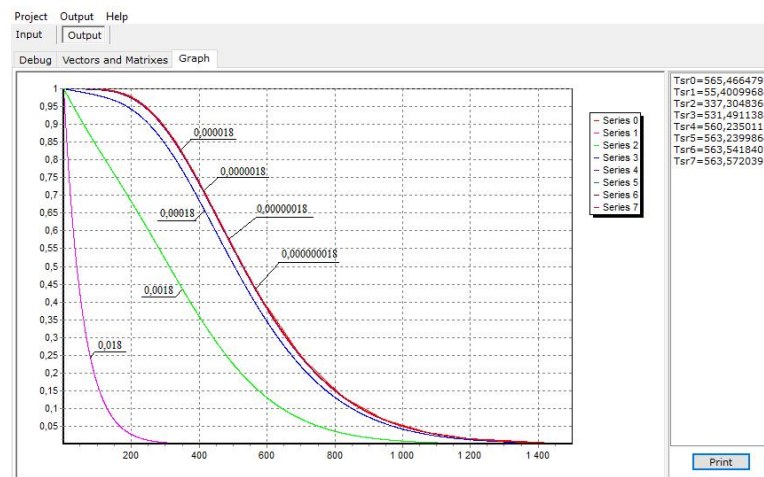


Рис. 4. Залежність ймовірності безвідмовної роботи системи передавання даних від часу експлуатації при різних значеннях інтенсивності відмов комутатора (від $1,8 \cdot 10^{-2}$ до $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$)

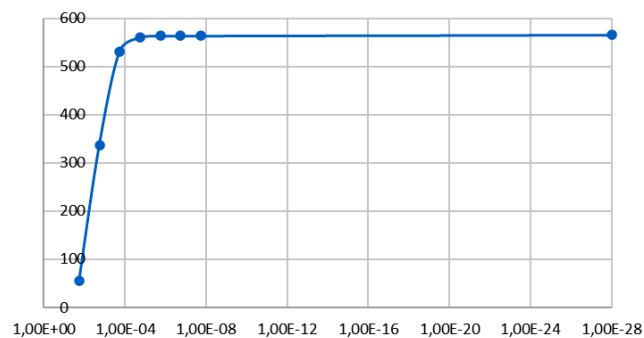


Рис. 5 Залежність середнього часу роботи до відмови (MTTF) системи передавання даних від інтенсивності відмов комутатора

З отриманої залежності ймовірності безвідмовної роботи від часу експлуатації (рис. 5) системи передавання даних можна зробити такі висновки:

а) за ідеальної надійності комутатора (інтенсивність відмов комутатора прийнято $1,8 \cdot 10^{-28}$ год⁻¹) середній час роботи до відмови системи передавання даних становить 565,466 год;

б) якщо надійність (інтенсивність відмов) комутатора співмірна з надійністю модулів системи передавання даних і становить $1,8 \cdot 10^{-2}$ год⁻¹, $1,8 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹ та $1,8 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹, то загальна надійність системи передавання даних суттєво зменшується (криві ймовірності безвідмовної роботи при інтенсивностях відмов 0,018, 0,0018 та 0,00018 відповідно). Інтервал часу, протягом якого ймовірність безвідмовної роботи забезпечується на рівні 0,9, зменшується з 280 год при ідеальному комутаторі до 260 год при інтенсивності відмов $1,8 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹. За інтенсивності відмов комутатора $1,8 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹ цей інтервал зменшиться до 70 год, а за інтенсивності відмов $1,8 \cdot 10^{-2}$ год⁻¹ – до 21 год. Зменшення інтервалу становить 8 %, 79 % та 92 % відповідно. Це є неприйнятним для систем передавання даних. Отже, інтенсивність відмов комутатора в найгіршому випадку повинна бути співмірною з інтенсивністю відмов найбільш надійного модуля системи передавання даних. У нашому випадку, зменшення інтервалу часу, у разі якого забезпечується ймовірність безвідмовної роботи не менше 0,9, становить 8 %. А МТТФ зменшиться на 6 %, а саме з 565,466 год до 531,491 год;

в) якщо надійність комутатора на порядок і більше вища ніж надійність модулів системи передавання даних, то ймовірність безвідмовної роботи системи передавання даних та МТТФ наближаються до показників надійності системи з ідеальним комутатором (рис. 4, криві 0,000018, 0,0000018, 0,00000018, 0,000000018). При підвищенні надійності комутатора, тобто зменшенні інтенсивності його відмов на два, три чи чотири порядки, надійність системи передавання даних співмірна з надійністю системи передавання даних з ідеальним комутатором. Середній час роботи до відмови (МТТФ) системи передавання даних в цьому випадку буде: 563,239 год, 563,542 год та 563,572 год відповідно.

3.4. Дослідження показників надійності системи передавання даних за умови, що комутатор неідеально під'єднує резерв

У переважній більшості підходів [1; 3; 4; 14] при розрахунку показників надійності технічних систем вважається, що резервні модулі під'єднуються до основної конфігурації з імовірністю рівною одиниці. Однак на практиці ймовірність під'єднання резерву є меншою за одиницю, а це суттєво впливає на показники надійності програмно-апаратного пристрою. Неідеальність комутатора намагалися врахувати при розрахунку ймовірності безвідмовної роботи в [15–16], а саме за допомогою рекурсивних формул для резервованої системи з n компонентів та одним резервним модулем з неідеальною комутацією та постійною інтенсивністю відмов. Однак для інших конфігурацій ці формули не придатні. Крім того, на показники надійності впливає також швидкодія комутатора. Тож у цьому дослідженні ми будемо порівнювати показники надійності системи передавання даних із ідеальним комутатором (рис. 2) з комутатором, у якого ймовірність під'єднання змінюється від 0,5 до 0,99. Надійність комутатора під час проведення досліджень буде вищою, ніж надійність найбільш надійного модуля системи передавання даних і буде становити $1,8 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹. Для досліджень використаємо розроблену структурно-автоматну модель. У множині формальних параметрів будемо підставляти різні значення ймовірності спрацювання комутатора – P_k і багатократно запускати програмне забезпечення ASNA. Програмне забезпечення ASNA сформує та розв'яже систему диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, а тако побудує залежності ймовірності безвідмовної роботи та визначить середній час роботи до відмови (МТТФ).

Залежності ймовірності безвідмовної роботи наведено на рис. 6, а залежність середнього часу роботи до відмови (МТТФ) від ймовірності комутації – на рис. 7.

У разі збільшення ймовірності комутації від 0,5 до 0,9 МТТФ зростає практично лінійно. Однак у разі збільшення P_k від 0,9 до 0,99 середній час роботи до відмови починає зростати квадратично. Тому значення P_k потрібно вибирати більше за 0,99.

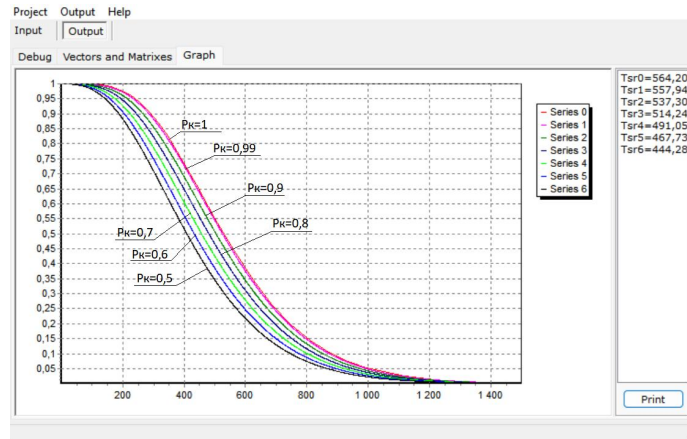


Рис. 6. Залежності ймовірності безвідмовної роботи від часу експлуатації при різних значеннях ймовірності спрацювання комутатора

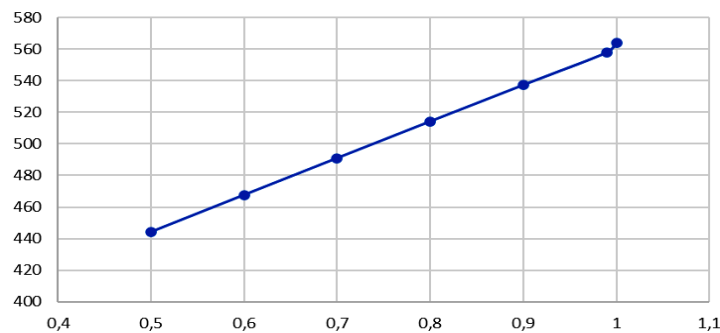


Рис. 7. Залежність середнього часу роботи до відмови від ймовірності комутації

3.5. Дослідження показників надійності системи передавання даних за умови, що швидкодія комутатора скінченна

Врахування швидкодії комутатора при розрахунку ймовірності безвідмовної роботи у відомих підходах оцінювання показників надійності не виявлено.

У цьому дослідженні необхідно визначити, чи впливає швидкодія комутатора на показники надійності системи передавання даних. Для проведення досліджень виберемо ймовірність перемикавання комутатора $P_k = 0,99$, інтенсивність відмов комутатора – $0,000018 \text{ год}^{-1}$. Тривалість комутації будемо змінювати від 10 с до 10^{-5} с . На рис. 8 наведено результати досліджень.

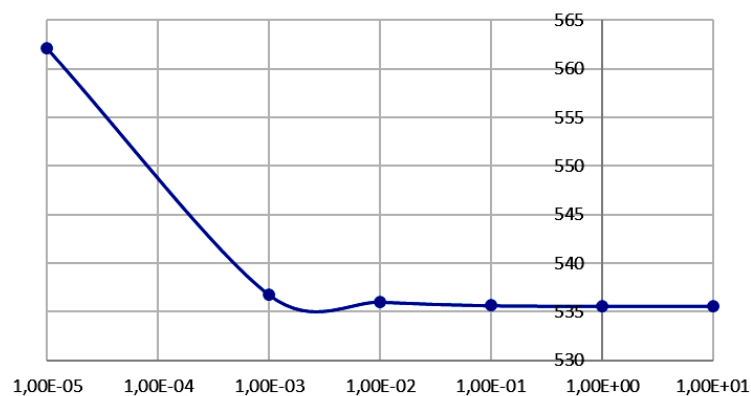


Рис. 8. Залежність середнього часу роботи до відмови при різних значеннях тривалості спрацювання комутатора

З проведених досліджень (рис. 8) видно, що зменшення часу комутації з 10 с до 1мс мало впливає на характер залежності ймовірності безвідмовної роботи. А вплив швидкодії комутатора на МТТФ стає суттєвим, коли тривалість комутації є менше за 1мс.

Висновки

1. Надійність комутатора є визначальним чинником забезпечення заданих показників надійності системи передавання даних. Проведені дослідження показали, що якщо інтенсивність відмов комутатора удвічі вища, ніж інтенсивності відмов модулів системи передавання даних, то у цьому випадку засоби під'єднання резерву можна вважати ідеальними, до того ж ймовірність безвідмовної роботи комутатора буде рівна одиниці. З точки зору практики така реалізація засобів під'єднання резерву буде дуже дорогою. Тому такі комутатори використовують, як правило, у системах відповідального призначення. Для відмовостійких систем передавання даних достатнім рівнем надійності комутатора буде зменшення його інтенсивності відмов на один рівень порівняно з найбільш надійним модулем. Зниження показників надійності у цьому випадку не перевищує 5 %, що не є критичним, а ціна комутатора буде меншою в кілька разів порівняно з більш надійними варіантами.

2. Ймовірність правильного спрацювання комутатора суттєво впливає на показники надійності систем передавання даних. У разі збільшення ймовірності комутації від 0,5 до 0,99 МТТФ зростає практично лінійно. Однак при збільшенні P_k від 0,99 до 0,999 середній час роботи до відмови починає зростати квадратично. Тому значення P_k варто вибирати більше за 0,99. При значенні ймовірності комутації 0,999 і вище матричний комутатор можна вважати ідеальним.

3. З проведених досліджень (рис. 8) видно, що зменшення часу комутації від 10 с до 1мс мало впливає на характер залежності середнього часу роботи до відмови (МТТФ). Вплив швидкодії комутатора на МТТФ відбувається тоді, коли тривалість комутації є 0,1мс або менше.

Список використаних джерел

- [1] David J Smith, (2022) *Reliability, Maintainability and Risk. Practical Methods for Engineers, Tenth Edition*, 2022, 496 p.
- [2] Dongdong Chen, Long Xiao, Hemiu Lian, Zhenming Xu, (2021) "A fault tolerance method based on switch redundancy for shunt active power filter", *Energy Reports, Volume 7, Supplement 1*, 2021, Pages 449-457
- [3] Israel Koren, C. Mani Krishna (2007) *Fault tolerant systems*, Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier, 2007, 378 p.
- [4] Pham H. (2003) *Handbook of Reliability Engineering*, London: British Library Cataloguing in Publication Data, 2003, 696 p.
- [5] Величко Н.І. (Керівник – Озірковський Л.Д.) (2023) *Оцінювання впливу засобів підключення резерву на показники надійності відмовостійких програмно-апаратних пристроїв. Бакалаврська кваліфікаційна робота*, Львів, Національний університет «Львівська політехніка», 2023, 81с.
- [6] <https://www.wti.com/pages/effective-power-redundancy-solutions-to-minimize-system-downtime>
- [7] Ryabtsev, V., Evdokimov, A., Almadi M., (2018) "Microprocessor Matrix Switcher for Diagnosing Digital Systems on Single Crystal," *2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2018, pp. 1-5
- [8] N. Wainstein, G. Adam, E. Yalon and S. Kvatinisky, (2021) "Radiofrequency Switches Based on Emerging Resistive Memory Technologies - A Survey", *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 1, pp. 77-95, Jan. 2021
- [9] *Redundancy in KVM extenders and matrix switches. Technology briefing (2013)*, IHSE GmbH, Germany, August 2013 (<https://www.ihse.de/wp-content/uploads/files/technology-briefings/ihse-tech-brief-redundancy-in-kvm.pdf>)
- [10] *M:N Redundancy Switch Installation and Operation Manual. (2013) Part Number MN-RCS20, Revision 15*, Comtech EF Data, 2013 (https://www.comtechefdata.com/files/MN-RCS20_15_10-18.pdf)

- [11] <https://www.quintechelectronics.com/applications/government-military.html>
- [12] Ю.Я. Бобало, Б.Ю. Волочий, О.Ю. Лозинський, Б.А. Мандзій, Л.Д. Озірковський, Д.В. Федасюк, С.В. Щербовських, В.С. Яковина, (2013) *Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем. Монографія, Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013, 300 с.*
- [13] Bohdan Volochiy, Bohdan Mandziy, Leonid Ozirkovsky, (2012) "Extending The Features of Software For Reliability Analysis of Fault-tolerant Systems", *Computational Problems of Electrical Engineering, Lviv Politechnic National University, 2012. - Volume 2, number 1, p. 113-121*
- [14] *Безопасность критических инфраструктур: математические и инженерные методы анализа и обеспечения* (2011), Под ред. Харченко В.С., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", 2011, 641 с.
- [15] Mustafa M. Alidrisi (1992) "The reliability of a dynamic warm standby redundant system of n components with imperfect switching", *Microelectronics Reliability, Volume 32, Issue 6, 1992, Pages 851-859*
- [16] Lun Ran, Jinlin Li, Xujie Jia, Hongrui Chu, (2014) "Optimal redundancy allocation for reliability systems with imperfect switching", *Journal of Systems Engineering and Electronic, Vol. 25, No. 2, April 2014, pp.332-339*

IMPACT ASSESSMENT OF MEANS OF CONNECTING THE RESERVE ON THE RELIABILITY INDICATORS OF THE DATA TRANSMISSION SYSTEM

L. Ozirkovsky, V. Pabyrivskiy, S. Mykytskyi, N. Velychko, N. Pryimak, Y. Zhuk

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

Structural redundancy is included in modern data transmission systems to ensure the specified reliability indicators. Structural redundancy gives the system fault tolerance and significantly increases its reliability. To manage the redundant resource, it is necessary to have additional tools that will connect the redundant equipment to the main configuration of the data transmission system. The redundant equipment is a separate technical means and, from the point of view of reliability, it is connected in series with other modules of the data transmission system. Thus, the inclusion of redundant connection facilities in the data transmission system reduces its reliability. In addition, even with perfect reliability, redundant connections may fail or malfunction and, under certain conditions, cause the transmission system to fail. To determine the impact of reserve connection facilities on the reliability of the transmission system, the article applies an original technology for building models of discrete-continuous stochastic systems. ASNA software was used as a software tool for modeling the reliable behavior of the data transmission system. This software provides automated construction of the model in the form of a graph of states and transitions based on a structural automaton model. Based on the graph of states and transitions, an analytical model is automatically generated in the form of a system of linear differential Kolmogorov-Chapman equations. Using the developed model, the article quantitatively analyzes the impact of redundant connection means (switches) on the reliability indicators of the data transmission system. In the study, the proposed models, unlike the existing ones, take into account both reliability indicators (probability of failure) and functionality indicators (probability of switching, speed) of the reserve connection means. On the basis of the developed model, the limit values of reliability and functionality of the redundant connection means (switches) were determined, at which they will minimize the reliability of the fault-tolerant data transmission system. Based on the analysis of the obtained results, practical recommendations for the selection of reliability indicators of the backup connection means, their speed and probability of switching are formed.

Keywords: *reliability, reliability engineering, fault-tolerant systems, means of connecting the reserve, data transmission system, reliability indicators, state transition diagram, Markov model.*