

НАДІЙНІСТЬ ТА ЯКІСТЬ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

УДК 621.396.6.019.3+519.87

Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний, І.В. Кулик
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань

ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ВІДМОВОСТІЙКОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ МАЖОРИТАРНОЇ СТРУКТУРИ З ВРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ СТРАТЕГІЇ АВАРІЙНОГО ВІДНОВЛЕННЯ

© Мандзій Б.А., Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Змисний М.М., Кулик І.В., 2011

Об'єктом розгляду є відмовостійкі системи з комбінованим структурним резервуванням, яке містить мажоритарну структуру та ковзне резервування її робочих модулів. Таку відмовостійку систему використовують у практиці проектування програмно-апаратних радіоелектронних систем відповідального призначення та довготривалої експлуатації з аварійним відновленням. Розроблення моделей відмовостійкої системи здійснено з використанням технології аналітичного моделювання. Показано можливості використання розроблених моделей відмовостійкої системи для розв'язання задач її надійнісного проектування.

Ключові слова: надійність, відмовостійка система, мажоритарна структура, технічне обслуговування, аварійне відновлення.

The fault-tolerant systems with a combined structural redundancy, which includes the majority structure and sliding redundancy, are the object of consideration. Such systems in the practice of designing hardware and software of radio-electronic systems important purpose and long-term operation with disaster recovery are used. The development of models of fault-tolerant system implemented using the technology of analytical modeling is carried out. The possibilities of the developed models of fault-tolerant system for solving problems of reliability designing are shown.

Key words: reliability, fault-tolerant system, majority structure, maintenance, disaster recovery.

Постановка задачі

Під час розроблення обслуговуваних програмно-апаратних радіоелектронних систем (РЕС) відповідального призначення, для забезпечення потрібного рівня надійності, є популярною відмовостійка система (ВС) на основі мажоритарної структури (МС) [7]. Надійність таких відмовостійких систем у разі довготривалої експлуатації підвищують введенням ковзного резерву її робочих модулів і використанням відповідної стратегії технічного обслуговування [1, 2]. Для розв'язання задач надійнісного проектування таких РЕС, а саме задачі багатоваріантного аналізу та надійнісного параметричного синтезу, необхідно розробити моделі ВС. Такі моделі повинні мати високий ступінь адекватності подання не тільки структури, але і надійнісної поведінки, зумовленої алгоритмом використання резерву та стратегії технічного обслуговування. До того ж необхідно врахувати реальний закон розподілу для тривалостей технічного обслуговування, який в цій роботі вважається ерланговським [2]. Розроблення таких моделей передбачає два етапи. На першому етапі розробляють моделі у вигляді графа станів та переходів. Враховуючи складність і велику трудоемність цієї задачі, її доцільно розв'язувати з використанням удосконаленої технології аналітичного моделювання [3, 4]. На другому етапі здійснюється трансформація графа з використанням методу фаз Ерланга [5].

Конфігурація відмовостійкої системи

Конфігурація ВС на основі мажоритарної структури з ковзним резервуванням її робочих модулів наведена на рис. 1.

До складу відмовостійкої системи входять:

- ядро відмовостійкої системи (ВС), яке складається з n однотипних модулів основного функціонального призначення (МОФП);
- певна кількість m таких самих резервних модулів;
- детектор розузгодження (ДР);
- мажоритарний елемент (МЕ) (відновлюваний орган);
- комутатор.

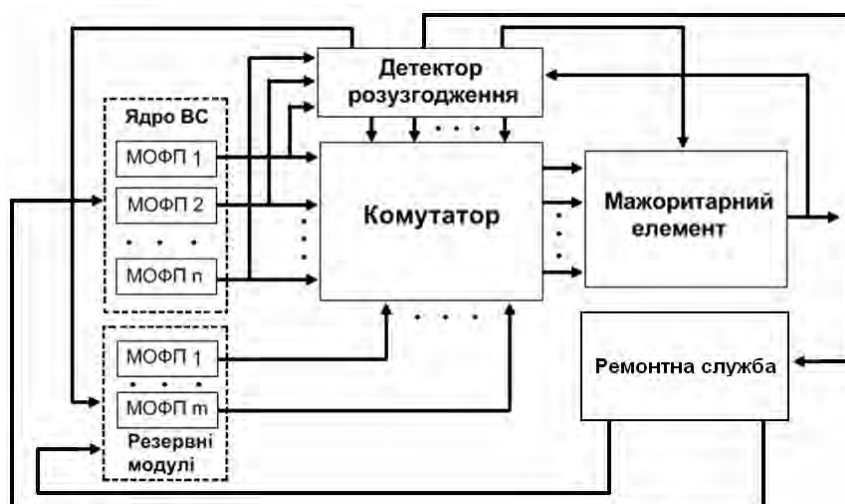


Рис. 1. Конфігурація відмовостійкої системи на основі мажоритарної структури та ковзним резервуванням її робочих модулів

Для досліджуваної системи під час експлуатації передбачено технічне обслуговування з стратегією аварійного відновлення [2, с. 162]. Тому додатковою функцією ДР є повідомлення ремонтної служби про наявність несправних МОФП.

Опис стратегії технічного обслуговування. Ремонтна служба перебуває на значній віддалі від об'єкта, що істотно спричиняє вплив затрат часу на прибуття ремонтника та показник надійності. Тому актуальною задачею є вибір моменту часу, коли отримано виклик і вирушили на об'єкт. У роботі показано вплив на показники надійності двох граничних варіантів виклику ремонтної служби:

1. Виклик передається в ситуації, коли чергова відмова МОФП призводить до катастрофічної відмови (вичерпано ковзний резерв і кількість робочих модулів в ядрі МС є мінімально допустимим).
2. Виклик передається після першої відмови модуля в ядрі МС.

У розроблених моделях можливості ремонтної служби подано так:

✓ Коли ремонтник прибуває на об'єкт, він здійснює відновлення всіх несправних МОФП відмовостійкої системи. Відремонтовані модулі поповнюють ядро МС та ковзний резерв.

✓ Кількість виїздів (ремонтів) ремонтника є обмеженою, що зумовлено наявною кількістю запасних ремонтних комплектів (модулів), які виділені для технічного обслуговування відмовостійкої системи.

✓ Тривалість відновлювальних робіт включає тривалість ремонту і затрати часу для прибуття ремонтника на об'єкт.

✓ В інтервалі часу після виклику ремонтної служби і до моменту прибуття ремонтника на об'єкт (до початку ремонту) можлива відмова МОФП. Ймовірність відмови МОФП в ядрі МС за час ремонту (заміни) несправних модулів не враховується.

Розроблення моделей відмовостійкої системи

Згідно з постановкою задачі дослідження розроблено дві моделі відмовостійкої системи. Модель 1 і модель 2 відповідно з першим і другим варіантами передавання виклику в ремонтну службу. Розроб-

ляють моделі за технологією, поданою в [4]. Ця технологія дозволяє автоматизувати розроблення графа станів та переходів, що важливо під час розв'язання задач багатоваріантного аналізу та параметричного синтезу. Практичне використання цієї технології забезпечує програмний модуль ASNA-1.

У цій технології об'єкт дослідження необхідно подати у вигляді структурно-автоматної моделі. Розроблення структурно-автоматної моделі ВС на основі МС передбачає: визначення базових подій, визначення компонент вектора станів, визначення умов і обставин, за яких відбуваються базові події, компонування формул розрахунку інтенсивностей базових подій (ФРІБП) та формування правил модифікації компонент вектора станів (ПМКВС). Події, що відбуваються у ВС, зумовлені надійнісною поведінкою, наведеною в табл. 1. Аналіз поданих в таблиці подій дає змогу визначити базові події.

Таблиця 1

Зображення пар подій, які фіксують початок і закінчення часового інтервалу перебування досліджуваної відмовостійкої системи в певному стані

Пор. № пари подій	Подія, яка фіксує початок перебування в стані	Подія, яка фіксує закінчення перебування в стані (базова подія)	Тривалість часового інтервалу між подіями (сер. знач.), [с]
1	„Початок роботи системи”	„Відмова модуля в ядрі МС”	t_1
2	„Початок процедури виявлення несправного модуля в ядрі МС”	„Закінчення процедури виявлення несправного модуля в ядрі МС”	t_2
3	„Початок процедури відключення несправного модуля з ядра МС”	„Закінчення процедури відключення несправного модуля з ядра МС”	t_3
4	„Початок процедури підключення резервного модуля в ядро МС”	„Закінчення процедури підключення резервного модуля в ядро МС”	t_4
5	„Виклик ремонтної служби та початок очікування процедури ремонту (заміни) несправних модулів”	„Закінчення ремонту (заміни) несправних модулів”	t_5
6	„Початок процедури підключення відновлених модулів в ядро МС”	„Закінчення процедури підключення відновлених модулів в ядро МС”	t_6
7	„Початок процедури підключення відновлених модулів в ковзний резерв”	„Закінчення процедури підключення відновлених модулів в ковзний резерв”	t_7

Якщо тривалість певної процедури порівняно з іншими є дуже малою і прийнятним є допущення, що ця тривалість дорівнює нулю, то з подальшого розгляду пара подій, яка відповідає цій процедурі, знімається. Але базова подія з цієї пари дістає статус зведеної базової події. Функціональні модулі: детектор розузгодження, модуль перемикавання, відновлюваний орган є надійними і мають час напрацювання до відмови більший за час експлуатації системи. Тому знято з розгляду події: „Відмова детектора розузгодження”; „Відмова комутатора”, „Відмова мажоритарного елемента”.

На основі наведених міркувань у перелік базових подій входять події: „Відмова модуля в ядрі МС”, „Закінчення процедури виявлення несправного модуля в ядрі МС”, „Закінчення ремонту (заміни) несправних модулів”.

Розроблені структурно-автоматні моделі відмовостійкої системи подані в табл. 2 (модель 1) і в табл. 3 (модель 2).

У структурно-автоматних моделях враховано (відображено) такі параметри відмовостійкої системи та ремонтної служби: n – кількість модулів в ядрі МС; m – кількість модулів ковзного резерву; λ_n – інтенсивність відмов одного модуля в ядрі МС або в ковзному резерві; T_i – середнє значення інтервалу часу, між двома послідовними перевірками наявності несправного модуля в ядрі МС; r – максимальна кількість запасних модулів на складі для заміни (ремонту) несправних модулів; T_r – середнє значення інтервалу часу, необхідного на ремонт одного модуля; T_p – середнє значення інтервалу часу, необхідного на приїзд ремонтної служби.

В структурно-автоматних моделях відмовостійкої системи, вектор станів подано такими компонентами:

V1 – відображає поточну кількість працездатних модулів в ядрі МС (початкове значення компоненти V1 дорівнює кількості модулів робочої конфігурації n);

V2 – відображає поточну кількість несправних модулів в ядрі МС (початкове значення компоненти V2 дорівнює нулю);

V3 – відображає поточну кількість працездатних модулів у резерві (початкове значення компоненти V3 дорівнює кількості модулів у резерві m);

V4 – відображає поточну кількість модулів, що перебувають у черзі на ремонт (початкове значення компоненти V4 дорівнює нулю);

V5 – лічильник кількості використаних запасних модулів на складі для ремонту (заміни) несправних модулів (початкове значення компоненти V5 дорівнює r);

V6 – ознака тимчасового стану. Ця компонента потрібна для того, щоб під час визначення станів не формувалися зайві стани. Значення V6 встановлюється в одиницю при події „Відмова модуля в ядрі МС” і скидається в нуль при події „Закінчення процедури виявлення несправного модуля в ядрі МС”. Початкове значення компоненти V6 дорівнює нулю.

Таблиця 2

Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи для першого варіанта виклику ремонтної служби (модель 1)

Базові події	Умови і обставини	ФРІБП	ПМКВС
Відмова модуля в ядрі МС	$(V1 \leq ((n+1)/2)) \text{ AND } (V6=0)$	$V1 \times \lambda_n$	$V1:=V1-1; V2:=V2+1; V6:=V6+1;$
Закінчення процедури виявлення несправного модуля в ядрі МС	$(V2>0) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V6=1)$	$1/T_i$	$V1:=V1+1; V2:=V2-1; V3:=V3-1;$ $V4:=V4+1; V6:=0$
	$(V2>0) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V6=1)$	$1/T_i$	$V2:=V2-1; V4:=V4+1; V6:=0$
Закінчення ремонту (заміни) несправних модулів	$(V1=((n+1)/2)) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V4>0) \text{ AND } (V5>0)$	$1/(V4 \times Tr + Tr)$	$V1:=n; V3:=m; V4:=0; V5:=V5-1$
Критерій катастрофічної відмови $(V1 < ((n+1)/2))$			

Таблиця 3

Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи для другого варіанта виклику ремонтної служби (модель 2)

Базові події	Умови і обставини	ФРІБП	ПМКВС
Відмова модуля в ядрі МС	$(V1 \leq ((n+1)/2)) \text{ AND } (V6=0)$	$V1 \times \lambda_n$	$V1:=V1-1; V2:=V2+1; V6:=V6+1;$
Закінчення процедури виявлення несправного модуля в ядрі МС	$(V2>0) \text{ AND } (V3>0) \text{ AND } (V6=1)$	$1/T_i$	$V1:=V1+1; V2:=V2-1; V3:=V3-1;$ $V4:=V4+1; V6:=0$
	$(V2>0) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V6=1)$	$1/T_i$	$V2:=V2-1; V4:=V4+1; V6:=0$
Закінчення ремонту (заміни) несправних модулів	$(V1 < n) \text{ AND } (V1 \geq ((n+1)/2)) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V4>0) (V4 \leq V5)$	$1/(V4 \times Tr + Tr)$	$V1:=n; V3:=m; V5:=V5-V4; V4=0$
	$(V1 < n) \text{ AND } (V1 \geq ((n+1)/2)) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V4>0) (V4 > V5) \text{ AND } (V4 \leq (n-V1))$	$1/(V5 \times Tr + Tr)$	$V1:=V1+V5; V4:=V4-V5; V5:=0; V3:=0;$
	$(V1 < n) \text{ AND } (V1 \geq ((n+1)/2)) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V4>0) (V4 > V5) \text{ AND } (V4 > (n-V1)) \text{ AND } (V5 \leq (n-V1))$	$1/(V5 \times Tr + Tr)$	$V1:=V1+V5; V4:=V4-V5; V5:=0; V3:=0;$
	$(V1 < n) \text{ AND } (V1 \geq ((n+1)/2)) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V4>0) (V4 > V5) \text{ AND } (V4 > (n-V1)) \text{ AND } (V5 > (n-V1))$	$1/(V5 \times Tr + Tr)$	$V3:=V5-(n-V1); V1:=n; V4:=V4-V5;$ $V5:=0;$
Критерій катастрофічної відмови $(V1 < ((n+1)/2))$			

Структурно-автоматні моделі є універсальними для відмовостійкої системи на основі мажоритарної структури, з ковзним резервуванням її робочих модулів та технічним обслуговуванням. До того ж ці структурно-автоматні моделі можуть слугувати прототипом для розроблення нових структурно-автоматних моделей відмовостійких систем з аналогічним способом забезпечення відмовостійкості, але іншою стратегією технічного обслуговування. Обов'язковим етапом розробки структурно-автоматних моделей є їхня верифікація.

Приклади розв'язання задач надійнісного проектування

Задача 1. Порівняння надійності відмовостійкої системи для двох граничних варіантів виклику ремонтної служби за таких значень параметрів: $n = 7$; $m = 1$; $\lambda n = 0,001$ 1/год; $r = 4$; $T_i = 0,001$ год; $T_r = 0,1$ год; $T_p = 1$ год. Результат наведено на рис. 2.

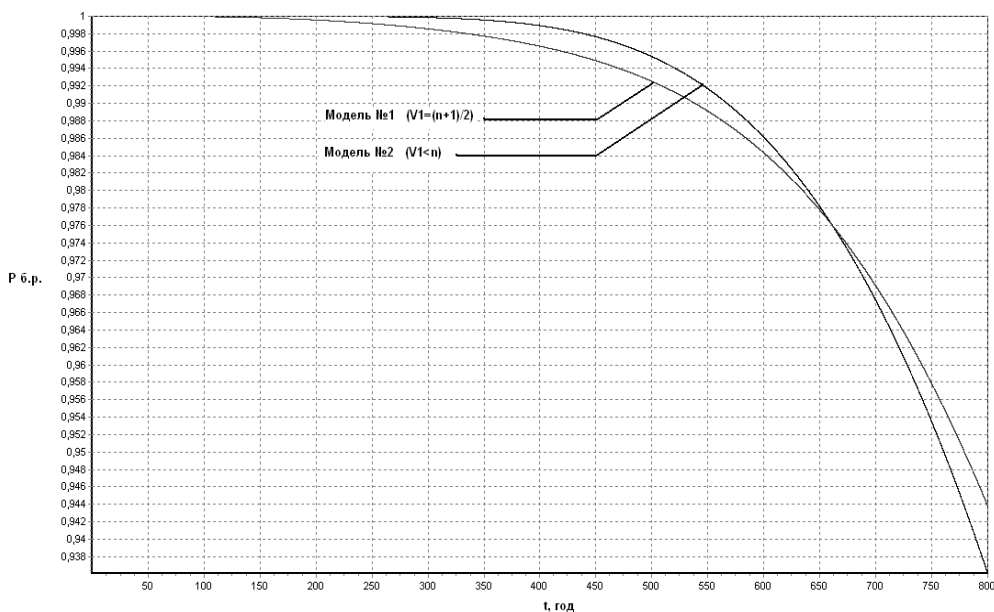


Рис. 2. Залежність ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи від часу (модель 1 і модель 2)

Задача 2. Дослідження впливу зміни кількості модулів в ядрі мажоритарної структури на показник надійності відмовостійкої системи для двох граничних варіантів виклику ремонтної служби. Значення параметрів, аналогічні, наведені в задачі 1. Результати показано на рис. 3.

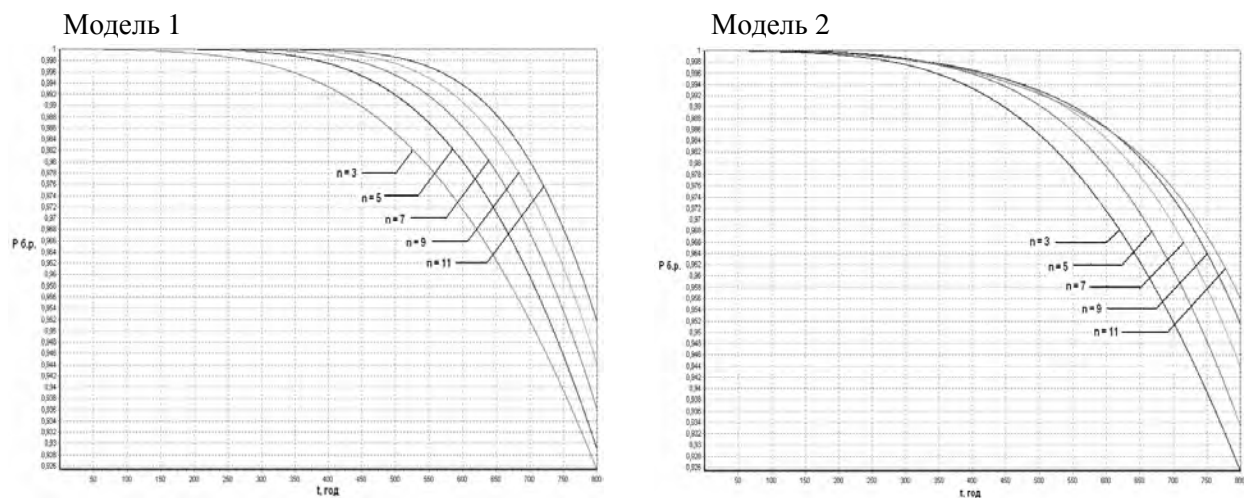


Рис. 3. Залежності ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи від часу і за різної кількості модулів в ядрі МС для моделей 1 і 2

Задача 3. Дослідження впливу кількості наявних на складі запасних модулів на показник надійності відмовостійкої системи для двох граничних варіантів виклику ремонтної служби за таких значень параметрів: $n = 5$; $m = 1$; $\lambda n = 0,01$ 1/год; $T_i = 0,001$ год; $T_r = 0,1$ год; $T_p = 1$ год. Результати наведено на рис. 4.

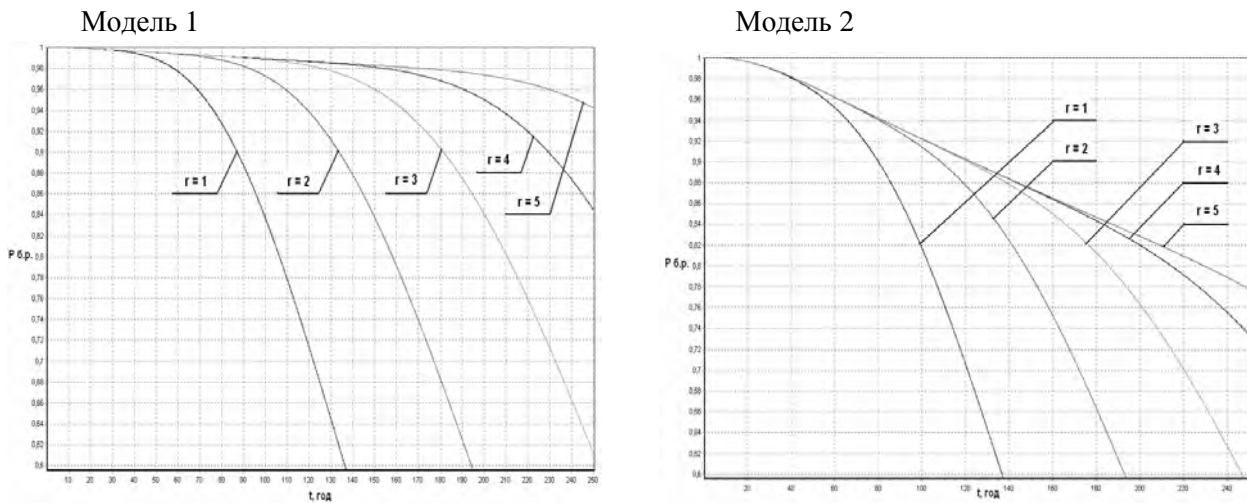


Рис. 4. Залежності ймовірності безвідмовної роботи від часу роботи відмовостійкої системи за різних значень початкової кількості запасних модулів на складі для двох граничних варіантів виклику ремонтної служби

Розроблення моделей відмовостійкої системи на основі МС з врахуванням ерланговського розподілу для тривалостей процесу відновлення

Вище під час побудови надійнісних моделей відмовостійкої системи прийнято, що тривалість всіх процесів, які можуть відбуватися в системі, мають експоненційний розподіл. Інтенсивності перебігу подій за такого допущення є сталими в часі величинами. Для підвищення адекватності моделей, а відповідно і точності визначення показників надійності необхідно враховувати реальні закони розподілу тривалості процесів.

Реально тривалість процесу відновлення, який об'єднує затрати часу на приїзд ремонтника і тривалість ремонту, може мати закон розподілу, близький до закону розподілу Ерланга четвертого порядку. Для переходу від стохастичної системи немарковського типу до стохастичної системи марковського типу, згідно з методом фаз Ерланга (ФЕ) [5, 6, 7], відповідні стани будуть замінені еквівалентним ланцюжком фіктивних станів.

Задача 4. Уточнення значень показника надійності у разі ерланговського закону розподілу тривалості відновлення для першого варіанта виклику ремонтника за таких значень параметрів: $n = 5$; $m = 2$; $L_n = 0,001$ 1/ч; $r = 8$; $T_e = 0,001$ ч; $T_r = 0,1$ ч; $T_p = 1$ ч; $M_u = 1/(3 \cdot T_r + T_p)$ – тривалість відновлення несправних модулів.

Для того, щоб використовувати метод ФЕ, необхідно, насамперед, за допомогою програмного модуля ASNA-1 побудувати граф станів та переходів як стохастичної системи немарковського типу, зображеного на (рис. 5). Зауважимо, що переходи із станів S6 і S13 відбуваються з змінною інтенсивністю.

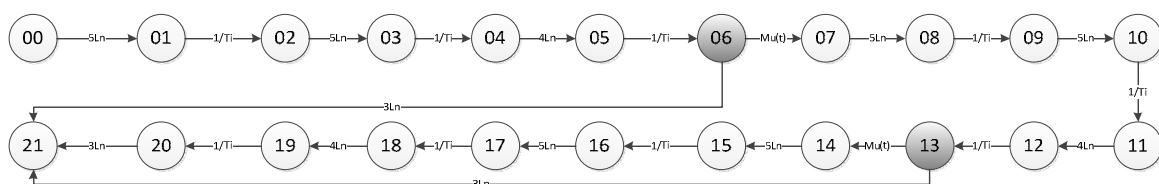


Рис. 5. Граф станів та переходів стохастичної системи немарковського типу для першого варіанта виклику ремонтника

Замінюємо переходи із станів S6 і S13 в такі стани ланцюжком фіктивних станів (рис. 6), де μ_{ie} – інтенсивність переходів між фіктивними станами. Тим самим переходимо до еквівалентної стохастичної системи марковського типу.

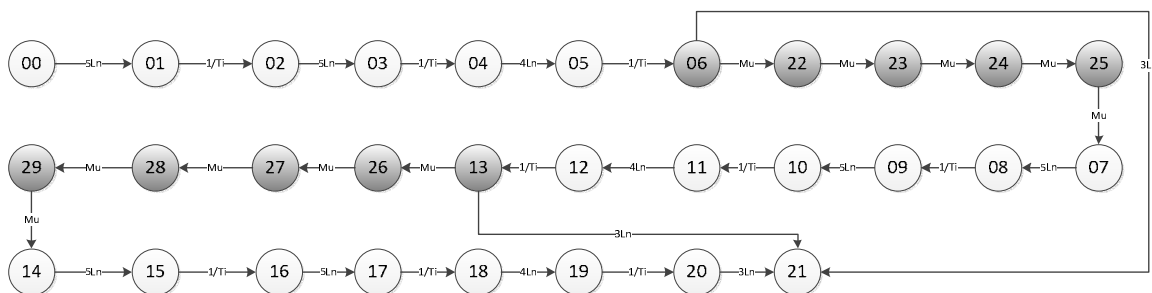


Рис. 6. Граф станів та переходів еквівалентної стохастичної системи марковського типу для першого варіанта виклику ремонтника

Для трансформованого графа станів та переходів формуємо та розв’язуємо систему диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена і визначаємо показники надійності, наведені на рис. 7.

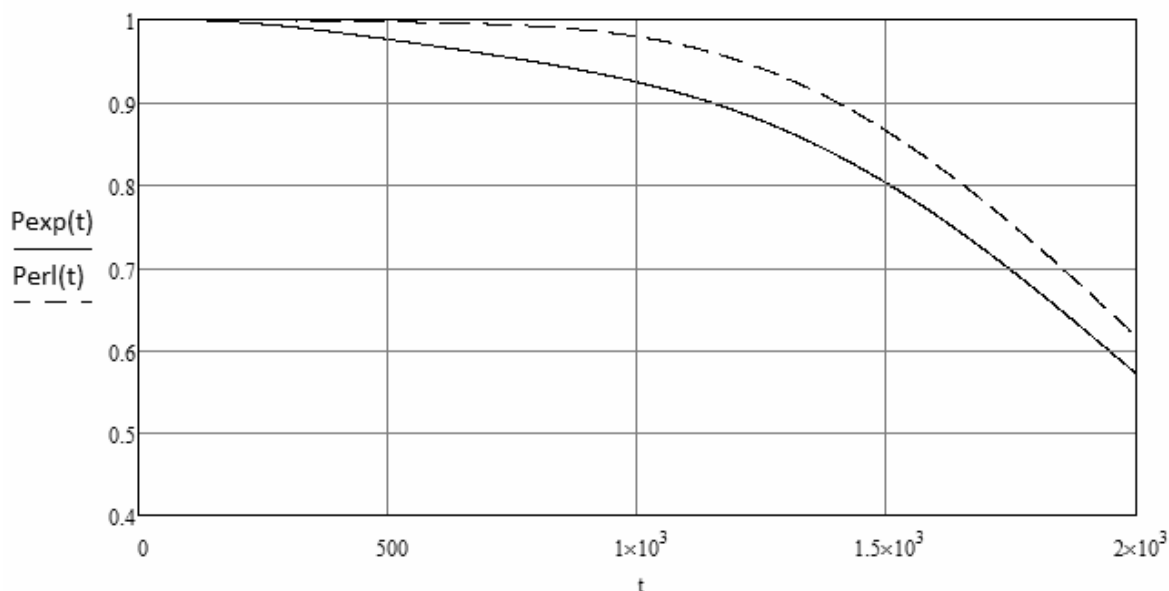


Рис 7. Залежність ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи від часу для першого варіанта виклику ремонтника

Отримані результати показують, що показник надійності “середнє значення тривалості роботи до катастрофічної відмови”, визначений без врахування реального закону розподілу для тривалості процесу відновлення за заданих вище значень параметрів, занижений на 4,7 %.

Задача 5. Уточнення значень показників надійності за ерланговського закону розподілу тривалості відновлення для другого варіанта виклику ремонтника. Значення параметрів наведені в задачі 4.

За допомогою програмного модуля ASNA-1 побудовано граф станів та переходів як стохастичну систему немарковського типу, зображеної на рис. 8. Зауважимо, що переходи із станів S4, S9, S14, S20, S21, S27, S28, S34, S35 і S39 відбуваються з змінною в часі інтенсивністю.

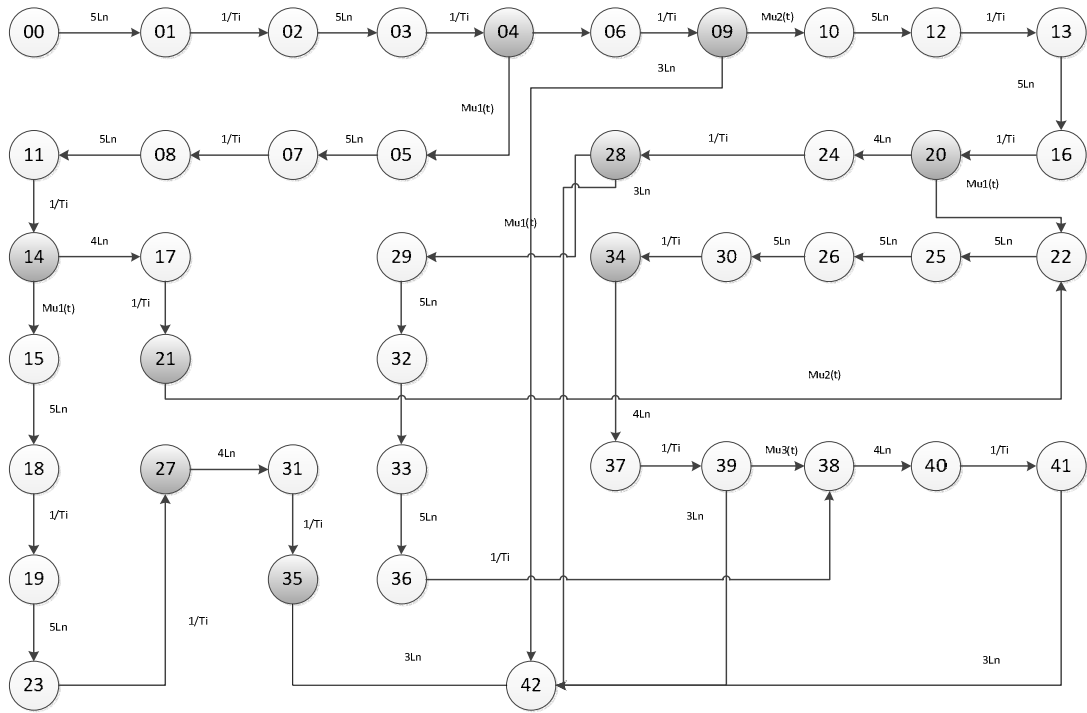


Рис. 8. Граф станів та переходів стохастичної системи немарковського типу для другого варіанта виклику ремонтника

Використовуючи метод ФЕ замінюємо позначені стани еквівалентними ланцюжками фіктивних станів. Трансформований граф наведено на рис. 9, де μ_{e1} , μ_{e2} , μ_{e3} – інтенсивності переходів між фіктивними станами.

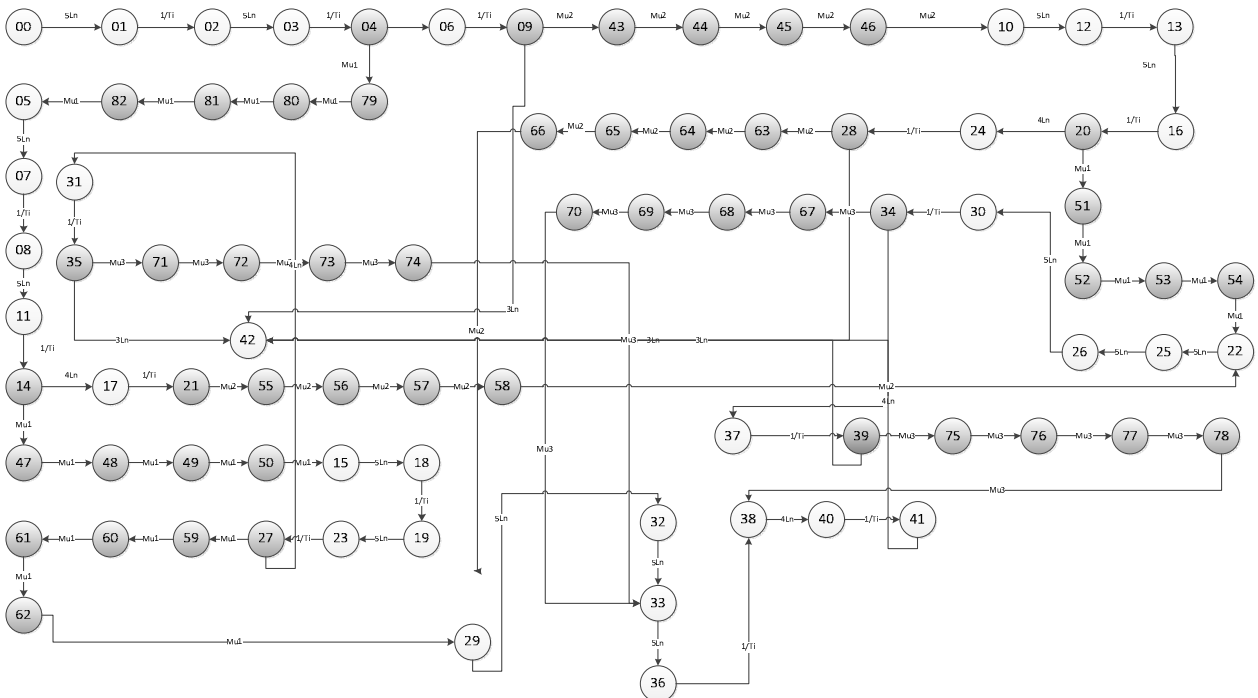


Рис. 9. Граф станів та переходів еквівалентної стохастичної системи марковського типу для другого варіанта виклику ремонтника

Для трансформованого графу станів та переходів складаємо та розв'язуємо систему диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена.

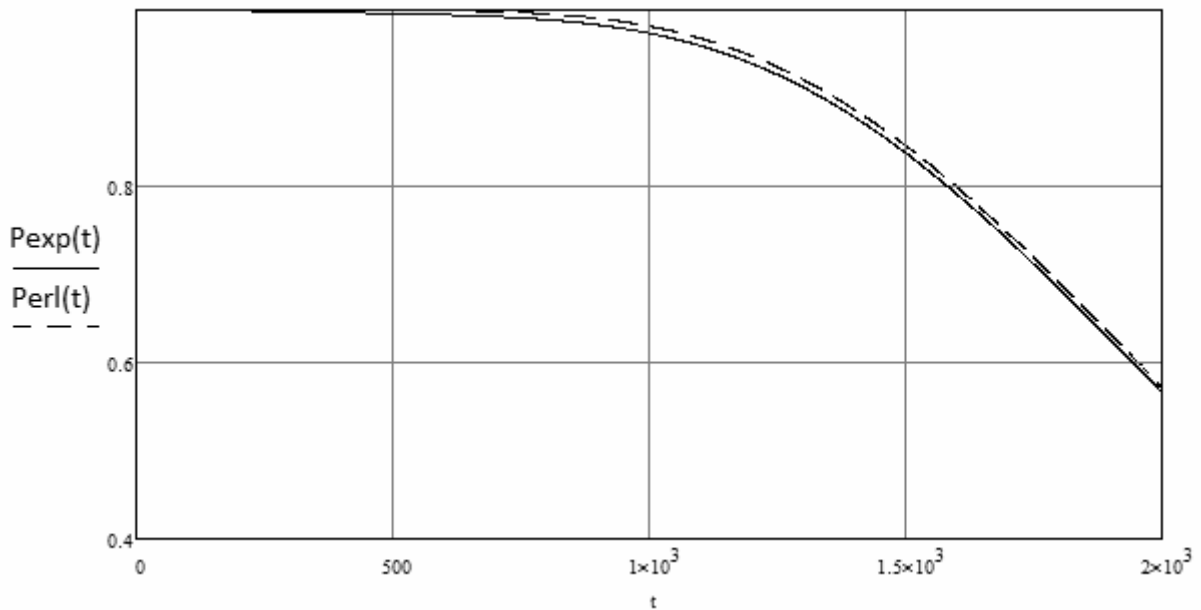


Рис. 7. Залежність ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи від часу для другого варіанта виклику ремонтника

Отримані результати показують, що показник надійності “середнє значення тривалості роботи до катастрофічної відмови”, визначений без врахування реального закону розподілу для тривалості процесу відновлення за заданих вище значень параметрів практично не відрізняється від отриманого.

Висновки

Показано можливості розв’язання задач надійнісного проектування під час визначення параметрів стратегії аварійного відновлення і відмовостійкої системи з комбінованим структурним резервуванням на основі мажоритарної структури.

1. Капитанов В.А., Медведев А.И. Теория надежности сложных систем (теория и практика). – М.: Европейский центр по качеству, 2002. – 470 с.
2. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
3. Мандзий Б.А., Волочий Б.Ю., Озирковский Л.Д. Новые возможности для исследования эффективности стратегий технического обслуживания отказоустойчивых систем с комбинированным резервированием // Надежность и качество: Труды международного симпозиума, Пенза, 21 – 31 мая 2007, Т. 2. Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза Россия: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. – С. 31 – 35.
4. Волочий Б.Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2004. – 220 с.
5. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Пер. с англ. И.И. Грушко; Под ред. В.И. Нейман. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
6. Райнишке К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов / Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1988 – 208 с.
7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука Гл. ред. физ. мат. лит. 1991. (Физико-математическая б-ка инженера.) – 384 с.
8. Змыслий М.М., Кулык И.В. Проектирование отказоустойчивых радиоэлектронных систем на основе мажоритарной структуры // Надежность и качество: Тр. междунар. симпозиума. Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза Россия: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2010.