

7. Слесаренко, А.П. Математическое моделирование высокоскоростных тепловых процессов при точном учете нестационарных осциллирующих условий теплообмена на поверхности конструктивных элементов / А. П. Слесаренко, Ю. О. Кобринович // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2011. - Т.5(70) – С.35-38.
8. Кобринович, Ю.О. Консервативные структуры решения в математическом моделировании высокоскоростного осциллирующего теплообмена / Ю.О. Кобринович// Современные проблемы математики и её приложения в естественных науках и информационных технологиях: Сб.тезисов докладов междунар. конф. - Харьков: "Апостроф", 2012. – С.58.
9. Слесаренко А.П. Моделирование и управление нестационарными температурными режимами при ограничениях на управление и скорость нагрева [Текст] / А. П. Слесаренко// Доповіді НАН України. – 2009. - №2. – С.83- 88.
10. Слесаренко, А.П. Математическое моделирование тепловых процессов в телах сложной формы при нестационарных граничных условиях [Текст] / А. П. Слесаренко// Проблемы машиностроения – 2002.– Т. 5, №4. - С. 72 – 80.
11. Слесаренко А. П. S-функции в обратных задачах дифференциальной геометрии и управлении образования форм [Текст] / А. П. Слесаренко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - 2012. – Т1, № 4(55). - С. 4–10. – Режим доступа : URL : http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3310.

В статті представлено розроблені автoрами теоретичні засади до автоматизації побудови надійнісних моделей резервованих та відновлюваних складних технічних систем у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова - Чепмена. Показано практичну реалізацію побудови моделей відмовостійких систем на основі структурно-автоматних моделей та приведено приклад багатоваріантного аналізу таких систем

Ключові слова: модель надійності, відмовостійка система, множина станів

В статті представлені розроблені автoрами теоретичні засади до автоматизації побудови надійнісних моделей резервованих та відновлюваних складних технічних систем в формі системи диференціальних рівнянь Колмогорова - Чепмена. Показано практичну реалізацію побудови моделей відмовостійких систем на основі структурно-автоматних моделей та приведено приклад багатоваріантного аналізу таких систем

Ключевые слова: модель надежности, отказоустойчивая система, множество состояний

УДК 621.396.6.019.3+519.87

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ НАДІЙНОСТІ РЕЗЕРВОВАНИХ ТА ВІДНОВЛЮВАНИХ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Б. А. Мандзій

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: bmandziy@lp.edu.ua

Л. Д. Озірковський

Кандидат технічних наук, доцент*

*Кафедра теоретичної радіотехніки та

радіовимірювань

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

E-mail: lozirkovsky@lp.edu.ua

1. Постановка задачі

Складність сучасних технічних систем обумовлює великі розмірності їх надійнісних моделей (порядку десятків – сотень тисяч), що практично унеможливує їх формування та аналіз ручними способами. Тому одночасно з вимогою високої достовірності від моделей вимагається відповідний рівень формалізації, який уможливує автоматизацію їх побудови та проведення аналізу надійності з використанням сучасних комп'ютерних засобів. Поєднання аналітичних методів дослідження надійності з обчислювальними можливостями сучасних комп'ютерів є перспектив-

ним напрямом подальшого розвитку методів теорії надійності [1, 5, 8, 9].

Серед аналітичних методів найбільшого поширення набули методи, основані на теорії марковських процесів, які розглядають випадкові події (відмови та відновлення), що слідує одна за одною у певній послідовності, як потік випадкових подій, і описують еволюцію в часі (перехід із стану в стан) складної технічної системи у вигляді диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена [1-9]:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -\sum_{j=1}^N \lambda_{ij}(t)P_i(t) + \sum_{j=1}^N \lambda_{ji}(t)P_j(t); i, j = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

де $P_i(t)$, $P_j(t)$ — імовірності перебування системи в момент часу t відповідно у станах x_i та x_j ,

$\lambda_{ij}(t)$ - інтенсивність переходу із стану x_i у стан x_j ;

$\lambda_{ji}(t)$ - інтенсивність переходу із стану x_j у стан x_i .

N - кількість можливих станів системи.

Рівняння (1) є математичною моделлю надійності технічної системи, яка описує в часі процес переходу системи із одного стану в інший і уможлиблює використання відомих математичних методів розв'язування диференціальних рівнянь для проведення надійнісного аналізу системи.

Ця модель у формалізованому вигляді описує з позиції надійності взаємодію елементів системи у процесі функціонування і відображає ступінь впливу надійності окремих елементів на надійність системи в цілому [2, 5-7, 9].

Кожен стан системи у відповідний момент часу характеризується вектором станів усіх елементів у той самий момент часу. Перехід системи із одного стану в інший відбувається миттєво внаслідок відмови чи відновлення одного із елементів, які прийнято вважати т.зв. базовими подіями [9]. Індивідуальними показниками надійності елементів системи є інтенсивності відмов (які характеризують інтенсивність переходу елемента від стану нормального функціонування до стану відмови) та інтенсивності відновлення (які характеризують інтенсивність переходу елемента від стану відмови до стану працездатності). Ці показники прийнято вважати незалежними самостійними даними.

Сучасні складні системи відповідального призначення мають властивість відмовостійкості [1-3, 5, 7, 9], тобто здатність нормально функціонувати в умовах відмов окремих елементів. Ця властивість досягається введенням різного роду надлишковості (структурної, алгоритмічної, часової та ін.), що призводить до ускладнення алгоритму внутрішньої поведінки системи внаслідок введення функцій контролю, локалізації несправностей, комутації та відновлення працездатності системи, що в результаті суттєво ускладнює модель надійності системи. У даній статті розглянуто процедуру автоматизованої побудови моделей надійності складних технічних систем, реалізовану у програмному модулі ASNA, розробленому на кафедрі «Теоретична радіотехніка та радіовимірювання» Національного університету «Львівська політехніка» [10, 11].

2. Формалізація процесу побудови моделей надійності

Для побудови моделі надійності у вигляді (1) необхідно визначити множину можливих станів системи N та сформулювати правила переходів між станами для різних типів систем з урахуванням перелічених вище припущень. Множину станів системи зручно представляти у вигляді матриці розмірністю $M \times N$, де M - кількість елементів системи, відмови та відновлення яких ураховують при побудові моделі, N - кількість можливих станів системи. Кожний стовець матриці є вектором станів елементів у певний момент часу і відповідає певному стану системи у цей самий момент, тобто елементами матриці є стани конкретних елементів. В загальному випадку будь-

який елемент системи може знаходитись в одному з таких станів:

- F – нормального функціонування;
- R – відновлення (ремонт);
- PF – припинення функціонування (простою), спричиненого відмовою (відновленням) іншого елемента;
- OF – очікування своєї черги на роботу (ненавантаженої резерв) з вказанням порядкового номера черги;
- OR – очікування своєї черги на ремонт із-за відсутності вільного ремонтного органу з вказанням порядкового номера черги;
- PR – припинення ремонту внаслідок початку відновлення елемента з вищим пріоритетом.

Зрозуміло, що в системах конкретних типів можливі лише окремі з перелічених станів елементів. Наприклад, в системах із загальним постійним навантаженим резервуванням без відновлень відсутні стани OF , PF , R , PR ; в системах із загальним постійним навантаженим резервуванням з відновленням за наявності одного ремонтного органу з прямим пріоритетом можливі лише стани F , R , OR .

Кількість усіх можливих станів системи N в загальному випадку визначається сумою усіх можливих розміщень із загального числа M елементів по n елементів:

$$N = \sum_{n=0}^M \frac{M!}{(M-n)!} \quad (2)$$

Множина усіх станів системи поділяється на дві підмножини: стани працездатності системи та стани непрацездатності. Цей поділ зручно реалізувати на підставі структурної схеми надійності системи, використовуючи функції алгебри логіки, зокрема, досконалу диз'юнктивну нормальну форму для опису станів працездатності системи через стани працездатності/непрацездатності елементів. Інформація про належність конкретного стану системи до тієї чи іншої підмножини відображається в матриці станів окремим рядком.

При формулюванні правил переходу системи із одного стану в інший приймаємо, що ці переходи спричиняються відмовою або відновленням одного із елементів системи. Одночасна відмова чи відновлення двох чи більше елементів неможлива. Зауважимо, що відмовою є переходи $F > R$ та $F > OR$, а відновленням $R > F$ та $R > OF$.

Для визначення можливості переходу системи із стану S_i до стану S_j потрібно співставити між собою відповідні елементи стовпців S_i та S_j матриці станів, які відображають стани конкретних елементів системи. Якщо для будь-якого k -го елемента стовпців S_i та S_j існують переходи $F > R$ чи $F > OR$ (або переходи $R > F$ чи $R > OF$) при допустимих переходах інших елементів, то перехід системи із стану S_i до стану S_j можливий внаслідок відмови (відновлення) k -го елемента.

Примітка. Допустимими є такі переходи: $F > F$; $F > PF$; $R > R$; $R > PR$; $PF > F$; $PF > PF$; $PR > R$; $PR > PR$; $OF > F$; $OF > OF$; $OR > R$; $OR > OR$.

Для різних типів систем можливі різні послідовності переходів їх елементів із одного стану в інший, що відображено в табл. 1.

Таблиця 1

Послідовності переходів їх елементів із одного стану в інший

№	Тип системи	Можливі переходи між станами елементів
1	Невідновлювана нерезервована	F>OR
2	Невідновлювана резервована з постійним навантаженим резервуванням	F>OR
3	Невідновлювана резервована заміщенням (ненавантажений резерв)	OF>F>OR
4	Відновлювана нерезервована з основним (послідовним) з'єднанням елементів	F>PF>F F>OR>R>F
5	Відновлювана резервована з постійним навантаженим резервуванням та прямим пріоритетом відновлення	F>OR>R>F
6	Відновлювана резервована з постійним навантаженим резервуванням та оберненим пріоритетом відновлення	F>OR>R>PR>R>F
8	Відновлювана резервована заміщенням (ненавантажений резерв) та прямим пріоритетом відновлення	OF>F>OR>R>F
9	Відновлювана резервована заміщенням (ненавантажений резерв) та оберненим пріоритетом відновлення	OF>F>OR>R>PR>R>F
10	Відновлювана резервована заміщенням (ненавантажений резерв) та призначеним пріоритетом відновлення	OF>F>OR>R>PR>R>F

Зауважимо, що в окремих випадках вектор станів системи може містити, крім інформації про стани елементів, ще додаткову інформацію, наприклад, про кількість вільних ремонтних органів, кількість можливих відновлень окремих елементів, наявність черги на роботу чи на відновлення тощо. Цю інформацію необхідно приймати до уваги при розгляді можливих переходів із одного стану в інший.

Інформація про можливі переходи системи за один крок може бути подана у вигляді матриці переходів P , розмірність якої, як і розмірність матриці станів, дорівнює $M \times N$. Елементами P_{ki} і-го стовпця матриці P є номери (коди) станів, до яких система може перейти із стану S_i внаслідок відмови (відновлення) k -го елемента. На підставі матриці переходів можна сформувати систему рівнянь Колмогорова-Чепмена та побудувати граф станів і переходів, який наочно відображає надійнісну поведінку системи.

3. Структурно - автоматна модель, як формалізований опис об'єкта дослідження

Вхідну інформацію про об'єкт дослідження для програмного модуля ASNA необхідно подати у вигляді структурно-автоматної моделі (САМ) [9], яка є формалізованим описом структури та алгоритму надійнісної поведінки системи, тобто правил переходу із одного стану в інший при відмовах та від-

новленнях елементів. На підставі САМ програмний модуль ASNA [10, 11] формує перелік усіх можливих станів системи, таблицю переходів системи з одного стану до іншого, яка трансформується у матрицю інтенсивностей переходів при введенні числових значень інтенсивностей відмов та відновлень елементів системи. Відтак на підставі матриці інтенсивностей модуль ASNA автоматично формує систему диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена (1), розв'язує її методом Рунге-Кутта-Мерсона, і в результаті користувач отримує часові залежності ймовірностей перебування системи у кожному із можливих станів. На підставі цієї інформації користувач може визначити як стандартизовані показники надійності системи (ймовірність безвідмовної роботи, функцію готовності, ймовірність відмови, параметр потоку відмов, середній час до відмови тощо), так і довільні показники, які можуть бути потрібними при «тонкому» дослідженні системи (ймовірність простою, ймовірність наявності не менше ніж N працездатних елементів при використанні певної кількості відновлень тощо).

Структурно-автоматна модель складається з трьох множин даних [9].

Першу множину утворює вектор станів (ВС), який дає змогу формалізовано описати весь перелік станів за допомогою змінних – компонентів ВС. Компонентами ВС є змінні, які описують стани елементів системи. Вектор стану може містити додаткові компоненти, які служать для відслідковування додаткових властивостей стану, наприклад, лічильник поточної кількості ремонтів кожного модуля зокрема, лічильник усіх ремонтів, лічильник загальної кількості модулів які вийшли з ладу тощо.

Наприклад, для системи, яка складається з трьох елементів, кожний ВС буде мати 3 компоненти: V_1, V_2, V_3 . Кожен компонент приймає значення 1, якщо відповідний елемент працездатний, або значення 0, якщо він непрацездатний. Якщо усі елементи відновлювані, причому кількість відновлень обмежена, то в такому випадку необхідно ввести ще 3 додаткові компоненти - V_4, V_5, V_6 , які будуть приймати значення поточної кількості відновлень кожного елемента. Якщо потрібно контролювати лише загальну кількість відновлень елементів, то достатньо лише одного додаткового компонента - V_4 . Якщо необхідно контролювати кількість непрацездатних елементів, то у ВС необхідно ввести ще один додатковий компонент. Слід зауважити, що збільшення кількості компонентів ВС дає змогу, з одного боку, проводити більш глибокий аналіз системи, а, з другого боку, ускладнює її аналіз, збільшуючи кількість можливих станів системи.

Другою множиною САМ є константи - множина формальних параметрів (МФП), які характеризують структуру системи та її властивості, а саме: кількість елементів робочої конфігурації системи, кількість резервних елементів, їх інтенсивності відмов та інтенсивності відновлень, гранична кількість відновлень тощо. Так, для згаданої системи із трьох елементів у МФП входять інтенсивності відмов кожного елемента $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, інтенсивності їх відновлень μ_1, μ_2, μ_3 , гранична кількість відновлень кожного елемента KR_1, KR_2, KR_3 . Якщо потрібно контролювати лише

загальну кількість відновлень, то у МФП потрібно ввести лише значення граничної кількості відновлень KR.

Третьою множиною є дерево правил модифікації (ДПМ) вектора стану, яке задається в табличній формі і відображає наслідки, які наступають після відмови чи відновлення окремих елементів за певних умов. Компонентами ДПМ є події, які можуть відбутись з елементами (відмова чи відновлення елемента, підключення резерву тощо), множина логічних умов, які визначають комбінації значень компонентів вектора стану, при яких може відбутись дана подія, а також правила модифікації ВС (ПМВС). Кожній умові відповідає формула розрахунку інтенсивності переходу (ФРІП).

Наслідком події є зміна компонентів ВС і перехід системи з одного стану в інший відповідно до правил переходу. Якщо окремим елементам властиві більше ніж один тип відмов (наприклад, обрив і коротке замикання), ймовірності появи яких відомі, то в таких випадках використовують множину формул розрахунку ймовірностей альтернативних переходів (ФРІАП), для кожної з яких використовують окреме правило переходу із множини ПМВС.

Наприклад, для системи, що складається з 3-х елементів, які після відмови можна відновлювати, але загальна кількість відновлень кожного з них не може перевищувати значення KR, ДПМ буде мати вигляд, поданий у табл. 2.

Таблиця 2

Дерево правил модифікації

Події	Умови	ФРІП	ФРІАП	ПМВС
Вихід з ладу елемента 1	$V1=1$	λ_1	1	$V1=0$
Вихід з ладу елемента 2	$V2=1$	λ_2	1	$V2=0$
Вихід з ладу елемента 3	$V3=1$	λ_3	1	$V3=0$
Ремонт елемента 1	$V1=0 \text{ AND } V4 < KR1$	μ_1	1	$V1=1; V4:=V4+1$
Ремонт елемента 2	$V2=0 \text{ AND } V5 < KR2$	μ_2	1	$V2=1; V5:=V5+1$
Ремонт елемента 3	$V3=0 \text{ AND } V6 < KR3$	μ_3	1	$V3=1; V6:=V6+1$

Множина усіх можливих станів системи генерується автоматично перебором можливих комбінацій компонентів ВС та умов, за яких здійснюються відповідні події. Ця множина поділяється на дві підмножини: стани працездатності та стани непрацездатності системи. Стани непрацездатності об'єднують в один поглинаючий стан. Умова попадання системи в поглинаючий стан називається умовою катастрофічної відмови, яка записується у вигляді логічної умови.

Для систем з послідовно чи паралельно з'єднаними елементами ВС, МФП та ДПМ будуть однаковими, проте вони різняться умовою катастрофічної відмови – логічним виразом непрацездатності системи. Так, для системи з послідовним з'єднанням 3-х

елементів умова катастрофічної відмови буде мати вигляд: $V1=0 \text{ OR } V2=0 \text{ OR } V3=0$, тобто вона вийде з ладу, якщо хоча б один елемент вийде з ладу.

Для системи з паралельним з'єднанням 3-х елементів умова катастрофічної відмови буде мати вигляд: $V1=0 \text{ AND } V2=0 \text{ AND } V3=0$, тобто вона вийде з ладу, якщо і перший, і другий, і третій елементи вийдуть з ладу.

Умова катастрофічної відмови також служить для об'єднання сукупності станів непрацездатності в один.

Наприклад, система, яка складається з M послідовно з'єднаних елементів виходить з ладу, якщо вийде з ладу хоча б один елемент, і станів непрацездатності буде M. Якщо нас цікавить тільки сам факт виходу з ладу системи, то усі стани непрацездатності об'єднуються в один із підсумовуванням ймовірностей кожного стану, що об'єднується.

4. Приклад застосування структурно-автоматної моделі для автоматизованої побудови надійнісної моделі резервованої системи з відновленням

Об'єктом дослідження є відмовостійка технічна система, яка складається з одного модуля робочої конфігурації, одного модуля в полегшеному резерві та одного модуля в холодному резерві (інтенсивності відмов кожного з модулів є різними: $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$). При виході з ладу модуля робочої конфігурації він замінюється модулем із полегшеного резерву, а модуль з холодного резерву переходить у полегшений резерв (черговий режим). Модулі, які вийшли з ладу, стають в чергу на ремонт. Після ремонту модулі переводяться або в стан полегшеного, або в стан холодного резерву. Ремонт здійснюється з інтенсивністю μ_i . Загальна кількість ремонтів обмежена значенням $KR=3$.

Вектор стану містить три компоненти: $V1, V2, V3$, кожен з яких може приймати два значення: 1 – модуль працездатний, 0 – модуль відмовив. Початкові значення компонентів ВС: $V1=1, V2=1, V3=1$. Оскільки кількість ремонтів обмежена, то для відображення їх поточної кількості введено компонент $V4$ – лічильник поточної кількості ремонтів. Крім інформації про працездатність модуля в кожному стані потрібно мати інформацію про те, скільки разів відмовив кожен модуль за час роботи системи. Для цього вводяться компоненти $V5, V5, V7$, початкове значення кожного компонента дорівнює нулеві. Компоненти ВС і їх початкові значення введені у відповідну вкладку (Vectors and refuse expression) програмного модуля ASNA (рис. 1а).

Для формування показників надійності необхідна інформація лише про працездатні стани, тому для редукування кількості станів усі стани непрацездатності об'єднані в один за допомогою умови катастрофічної відмови (Refuse Expression). В це поле записують логічний вираз непрацездатності системи.

Множина формальних параметрів (Constants and info) буде містити інтенсивності відмов кожного з модулів - $L1, L2, L3$, інтенсивність ремонту - μ_i та максимальне значення кількості ремонтів - R (рис. 1б).

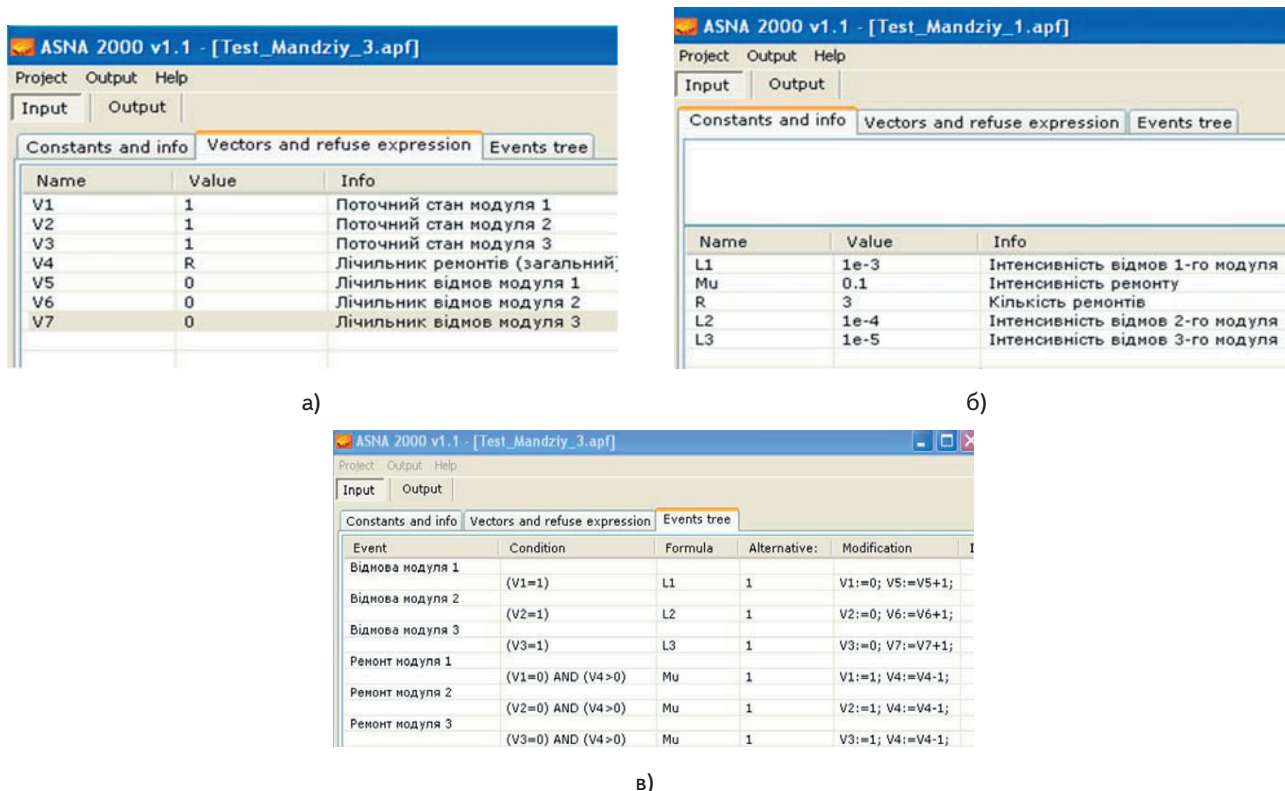


Рис. 1. Структурно-автоматна модель: а) – компоненти вектора стану і їх початкові значення, б) – множина формальних параметрів, в) – дерево правил модифікації

В процесі функціонування резервованої системи, з точки зору надійності, з кожним її модулем, зокрема, може статися подія – *Відмова модуля*. Ця подія відбувається лише за умови, що модуль справний ($V_n=1$), оскільки несправний модуль вже не може відмовити. Інтенсивність відмови модуля його стан змінюється, оскільки він стає непрацездатним і значення відповідного компонента ВС стає рівним нулю $-V_n=0$. Крім цього збільшується на 1 значення компонента (V5, V6, V7), який показує скільки разів відмовив кожен модуль. Подія не має жодних альтернатив, тому ймовірність альтернативного переходу рівна одиниці. Весь цей опис необхідно помістити у Дерево правил модифікації (Event tree). На практиці це означає заповнити відповідні поля таблиці: у поле Події (Event) вписується подія – *Відмова модуля 1*, в поле Умови (Condition) умова при якій модуль може вийти з ладу – $V_1=0$, у поле ФРІП (Formula) – інтенсивність відмови відповідного модуля – L1, у поле ПМВС (Modification) – правило зміни компоненти ВС V1 при здійсненні події *Відмова модуля 1* – $V_1=0$ (модуль стає непрацездатним в результаті відмови). Лічильник V5 збільшується на одиницю: $V_5:=V_5+1$ і показує, що модуль 1 вже один раз відмовив. Альтернативних вислідів ця подія не дає, тому значення ФРІАП (Alternative) рівна одиниці.

Аналогічно заповнюється таблиця ДПМ для модулів 2 та 3 (рис. 1в).

Наступна подія, яка може відбутися з модулем в даній системі – це *Ремонт модуля 1*. Вона відбувається за умови, що модуль непрацездатний $V_1=0$. Інтенсивність ремонту – Mu. В результаті ремонту модуль стає працездатний, тобто $V_1=1$, а лічильник ремонтів V4 збільшується на 1. Альтернативних наслідків ця подія

не дає, тому значення ФРІАП рівна одиниці. Аналогічно заповнюється таблиця ДПМ для модулів 2 та 3 (рис. 1в). Після запуску програми ASNA сформовано надійнісну модель системи, яка містить 140 станів та 470 переходів.

На основі матриці інтенсивностей переходів програма ASNA автоматично формує систему диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, розв'язує її і розраховує показники надійності: часову залежність функції готовності та середній час роботи до відмови.

Якщо для проектанта важливою є інформація лише про загальну кількість ремонтів без урахування скільки разів відмовляв кожен модуль, то САМ можна спростити, вилучивши з множини ВС компоненти V5, V6, V7, залишивши без змін компоненти V1-V4. Множина формальних параметрів залишиться без змін, а у ДПМ для подій 1-3 зміняться ПМВС: замість $V_1:=0$; $V_5:=V_5+1$; потрібно записати $V_1:=0$. Аналогічні зміни будуть для подій 2 та 3. Після запуску програми ASNA отримуємо лише 28 станів та 103 переходи. Розрахунок функції готовності та середнього часу роботи до відмови показав, що ці показники не змінилися, при суттєвому зменшенні простору станів.

Якщо інтенсивності відмов всіх модулів є однакові (навантажений резерв) і немає потреби розрізняти стан кожного модуля окремо, САМ спроститься, зокрема, у МФП вводиться лише інформація про інтенсивність відмов модуля L1 та інтенсивність відновлення - Mu, а ВС містить лише два компоненти – V1(поточну кількість модулів) та V2(лічильник ремонтів). Також суттєво спроститься і дерево правил модифікації, яке буде містити лише дві події: *Відмова модуля* та *Ремонт модуля*. В результаті запуску програми ASNA отримуємо 12 станів та 30 переходів.

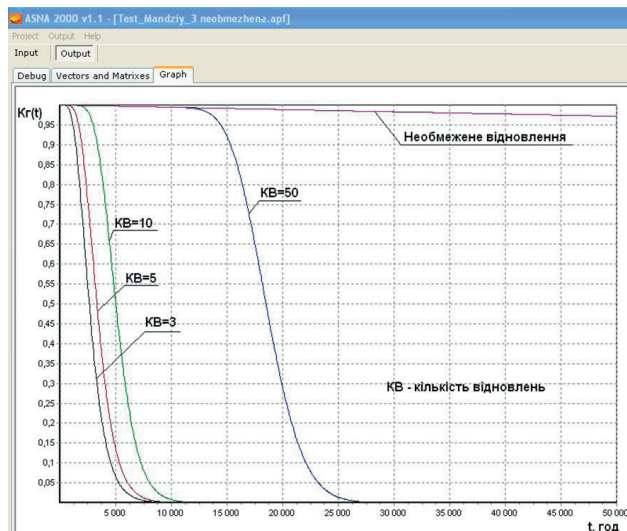


Рис. 2. Залежність функції готовності $K_g(t)$ від кількості відновлень

Якщо у попередніх двох моделях прийняти, що $L_1=L_2=L_3=1 \cdot 10^{-3}$ 1/год, то отримані часова залежність функції готовності та середній час роботи до відмови в усіх трьох моделях співпадуть.

Якщо в САМ, в умові події *Ремонт модуля* усунути лічильник відновлень, то отримаємо модель системи з необмеженою кількістю ремонтів, аналогічну як і в [1-3]. З рис. 2 видно, що така модель дає суттєво зави-

щений результат у порівнянні з системою з обмеженою кількістю ремонтів, оскільки їх функції готовності $K_g(t)$ суттєво різняться.

5. Висновки

Досвід показує, що «ручна» побудова простору станів відмовостійких систем навіть з невеликою кількістю елементів (до 10) без використання програмних засобів вимагає затрат часу порядку десятків годин. При зміні параметрів системи граф станів потрібно перебудувати спочатку, причому ймовірність внесення помилки в модель при мізерних шансах її виявлення є дуже високою. Формалізований опис об'єкта проектування у вигляді структурно-автоматної моделі дає змогу автоматизувати процедуру формування простору станів і суттєво скоротити часові затрати на побудову надійнішої моделі, а також провести багатоваріантний аналіз при зміні кількості резервних модулів, кількості ремонтів тощо. Наприклад, зміна кількості ремонтів розглянутої системи з 3 до 5 збільшує кількість станів із 140 до 392, а час розрахунку показників надійності займає лічені хвилини. Без використання програмних засобів проведення аналізу практично неможливе.

Затрати часу на побудову власне структурно-автоматної моделі досвідченим розробником, який має досвід їх розробки, становлять 1-2 год, що повністю себе оправдують при багатоваріантному аналізі відмовостійких систем.

Література

1. Birolini, A. Reliability Engineering. Theory and Practice [Text]/ A. Birolini. – Berlin: Springer, 2004. – 544 p.
2. Rausand, M. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications [Text]/ M. Rausand, A. Hoyland. – New York: John Wiley & Sons, 2004. – 636 p.
3. Jensen, U. Stochastic Models of reliability and Maintenance: An Overview [Text]/ U. Jensen // Reliability and Maintenance of Complex systems. – Berlin: Springer, 1996. – P. 3–35.
4. Van der Duyn Schouten, F. Maintenance Policies for Multicomponent systems [Text]/ F. Van der Duyn Schouten // Reliability and maintenance of complex systems. – Berlin: Springer, 1996. – P. 117–136.
5. Половко, А.М. Основы теории надёжности [Текст]/ А.М. Половко, С.В. Гуров. – С-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
6. Каштанов, В.А. Теория надёжности сложных систем (теория и практика) [Текст]/ В.А. Каштанов, А.И. Медведев. – М.: «Европейский центр по качеству», 2002. – 470 с.
7. Надёжность технических систем [Текст]: Справочник // Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др., под редакцией профессора И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь», 1985. – 608 с.
8. O'Connor, P. Practical Reliability Engineering [Text]/ P.O'Connor. – New York: John Wiley & Sons, 2002 – 540 p.
9. Волочий, Б.Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем [Текст]/ Б.Ю. Волочий. – Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 220 с.
10. The software for the analysis of reliability of fault-tolerant radio-electronic systems [Text]: Uradzenia I systemy radioelektroniczne UiSR'09, III Konferencja naukowa, Sochewka 23-25 wresnia. – Soczewka: Wojskowa Akademia Techniczna. – 2009.
11. Автоматизация моделирования поведения радиоэлектронных информационных систем [Текст]: Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009)», 8-10 жовтня 2009, м. Вінниця. – Вінниця, 2009. – 19 с.