

**ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ
В РАДІОЕЛЕКТРОНІЦІ**

УДК 621.37:004.052.3

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ МІНІМАЛЬНИХ СІЧЕНЬ ДЛЯ
ВІДМОВОСТІЙКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ
СТРУКТУРНО-АВТОМАТНОЇ МОДЕЛІ**

*Волочій Б. Ю., д.т.н., проф.; Озірковський Л. Д., к.т.н., доц.;
Мащак А. В., аспірант; Шкілюк О. П., аспірант; Кулик І. В., асистент.
Національний університет «Львівська політехніка», кафедра теоретичної
радіотехніки та радіовимірювань, Львів, Україна*

**COMPUTATION METHOD OF MINIMAL CUT SETS FOR FAULT-TOLERANT
SYSTEMS BASED ON STRUCTURAL-AUTOMATIC MODEL**

*Volochii B. Y., Doc. Of Sci (Technics), Prof.; Ozirkovskyi L. D., Cand. Of Sci (Technics),
associate prof.; Mashchak A. V., postgraduate student; Shkiliuk O. P., postgraduate stu-
dent; Kulyk I. V., assistant.*

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Вступ

Для систем відповідального призначення необхідно забезпечити високий рівень надійності та безпечності (*safety*) ще на етапі системотехнічного проектування, оскільки вихід з ладу такої системи на етапі експлуатації може призвести як до катастрофічних наслідків для навколишнього середовища так і загрожувати життю людей. Тому такі системи, як правило, реалізують як відмовостійкі структури.

Для усунення чи мінімізації наслідків відмов відмовостійких систем необхідно встановити сукупність підсистем чи модулів, вихід з ладу яких призводить до краху системи в цілому. Для цього потрібно врахувати комбінації подій, які можуть призвести до виникнення відмови системи. Такі поєднання подій можна отримати використовуючи мінімальні січення [7, 10], які визначаються на основі аналізу дерева відмов [1, 2, 4-6]. Дерево відмов – дедуктивний графічний метод опису комбінацій подій, котрі призводять до відмови системи, що дозволяє показати в явному вигляді слабкі місця системи [2, 8]. Однак, слід відзначити, що побудова дерева відмов є ручною та вимагає великих часових затрат. А дерева відмов, що описують системи відповідального призначення є, як правило, великої розмірності і їх складно формалізувати для подальшого аналізу, оскільки необхідно перебрати усі можливі комбінації аварійних ситуацій та враховувати зв'язки між ними.

В результаті аналізу дерева відмов отримують мінімальні січення, і на їх основі стає можливою модернізація системи, внаслідок чого можна зменшити потенційні небезпеки шляхом введення додаткової надлишковості, організації технічного обслуговування тощо [2].

Альтернативою дереву відмов є марковські моделі [9]. Такі моделі дають змогу отримати розподіл ймовірностей перебування в станах. На основі цього розподілу можна знайти комбінації подій, які будуть аналогічними мінімальним січенням для даної відмовостійкої системи.

Аналітична побудова марковських моделей вимагає великих часових затрат, однак існують технології, що дозволяють отримати марковські моделі автоматизованим способом [3, 8].

Отже, актуальною є автоматизована побудова мінімальних січень на основі марковської моделі.

Метою статті є опис методики розрахунку мінімальних січень для відмовостійких систем на основі структурно-автоматної моделі.

Основна частина

Для відмовостійких систем традиційна побудова марковської моделі у вигляді графу станів та переходів (ГСП) є складною та громіздкою задачею. Для побудови даної моделі проєктант повинен мати системне бачення, утримувати в пам'яті велику кількість вхідних даних та вміння, потрібне для реалізації безпосереднього переходу від об'єкту дослідження до моделі-посередника. Для складних об'єктів дослідження, у яких кількість станів визначається сотнями, а кількість переходів тисячами, використання цього ефективного методу моделювання в практиці системного аналізу стає неможливим.

Тому доцільно застосувати удосконалену технологію моделювання [3], яка дозволяє в автоматизованому режимі побудувати марковську модель. Дана технологія вимагає значно менших часових затрат та передбачає виконання наступних етапів:

- Розробка структурно-автоматної моделі;
- Генерація графу станів та переходів;
- Отримання та розв'язок системи диференційних рівнянь Колмогорова-Чепмена;
- Формування та дослідження показників надійності.

Структурно-автоматна модель (САМ) є формалізованим представленням системи та складається з таких елементів: вектор станів (ВС); множина формальних параметрів (МФП); формули для розрахунку інтенсивностей переходів (ФРП); формули для розрахунку ймовірностей альтернативних переходів (ФРІАП); дерево правил модифікації компонентів вектора стану (ДПМ); умова відмови (УВ).

Структурно-автоматна модель є вхідними даними для програмного засобу ASNA. Згідно технології моделювання [3], ввівши у відповідні поля

вхідні дані в автоматизованому режимі будується граф станів та переходів. Також в автоматизованому режимі, отримується та розв'язується система диференційних рівнянь (СДР) Колмогорова-Чепмена. В результаті її розв'язку отримується розподіл ймовірностей перебування системи у кожному з станів.

Формування методики розрахунку мінімальних січень на основі структурно-автоматної моделі

Січення (Cut Set) — така комбінація базових подій, при виникненні яких, обов'язково відбудеться основна подія — відмова системи.

Мінімальні січення (Minimal Cut Set) — така комбінація базових подій, забравши одну з яких, унеможлиблюється виникнення відмови системи.

Згідно [10], для знаходження мінімальних січень, необхідно знайти всі комбінації, при яких відбудеться відмова системи за найменшої кількості виходу з ладу елементів системи. Комбінація може містити лише один елемент. Це означатиме, що даний елемент — найбільш критична частина системи. Також можлива комбінація з декількох елементів. Вважається чим довше мінімальне січення (більша комбінація елементів), тим менш вразлива система.

Для отримання мінімальних січень необхідно розробити бінарну САМ. У такій САМ всі елементи структури можуть перебувати лише в одному з двох можливих станів — працездатний та непрацездатний.

Методика розрахунку мінімальних січень на основі САМ містить наступні етапи:

1. Розробка бінарної САМ, яка включає в собі МФП, ВС, ДПМ, ФРП, ФРАЙП та УВ і є вхідними даними для програмного засобу ASNA.

2. На основі побудованої САМ у автоматизованому режимі генерується граф станів і переходів та на його основі формується СДР Колмогорова-Чепмена.

3. В результаті розв'язку СДР отримується розподіл ймовірностей перебування у всіх станах.

4. З врахування умови відмови ймовірність безвідмовної роботи P дорівнюватиме сумі всіх отриманих працездатних станів в конкретний момент часу. Ймовірність відмови, відповідно буде дорівнювати $Q = 1 - P$.

5. На основі логічного аналізу структурної схеми системи, вибираються мінімальні січення.

6. Для визначення значення одного з мінімальних січень необхідно повторити п. 2-4, замінивши умову відмови на одне із січень. В матриці переходів з'явиться один додатковий стан, котрий матиме значення ймовірності виникнення даного мінімального січення.

7. Повторити п.6, доки не переберуться всі мінімальні січення, вибрані з п.5.

Сума всіх комбінацій відмов в результаті дасть розробнику загальне значення відмови системи — $Q_{\text{заг}}$. Відповідно до цього необхідно визначити процентне відношення усіх комбінацій до загальної відмови та сформулювати зведену таблицю мінімальних січень.

Приклад застосування методики побудови мінімальних січень на основі структурно-автоматної моделі

Відмовостійка система, складається з п'яти модулів А, В, С, D, Е. Модулі А, В, D — є основною робочою конфігурацією, яка забезпечує виконання цільової функції системи, а модулі С і Е — резервні. Модулі А і В зарезервовані модулем С. Вся система зарезервована модулем Е. Усі модулі мають однакову інтенсивність відмови $\lambda = 0,001$ та період спостереження становить $T = 100$ год.

Структурну схему надійності відмовостійкої системи показано на рис.1:

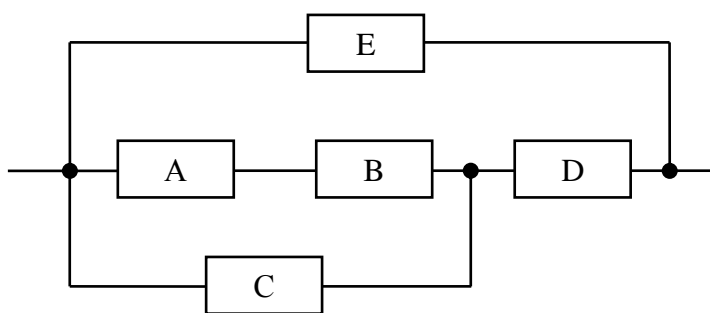


Рис.1. Структурна надійності відмовостійкої системи

На основі розробленої САМ даної відмовостійкої системи, яка складається з множини формальних параметрів, компонент вектора станів та умови відмови, дерева правил модифікацій, яка є входними даними програмного модуля ASNA в автоматизованому режимі було отримано граф станів та пе-

реходів (рис. 2).

На основі отриманого ГСП програмний модуль ASNA сформував СДР Колмогорова-Чепмена.

В результаті розв'язку СДР Колмогорова-Чепмена отримано ймовірності перебування у кожному стані. Ймовірність перебування у стані відмови буде рівною ймовірності відмови системи:

$$Q_{\text{заг}} = 1 - 0,9894 = 0,01061$$

На основі логічного аналізу структурної схеми надійності було визначено, що при виході з ладу модулів Е і D система відмовить в цілому. Далі, визначено дві комбінації котрі також призведуть до відмови системи в цілому — ACE та BCE.

Отже, ці три комбінації становитимуть мінімальні січення. Наступним етапом визначається кількісні значення кожної з цих комбінацій. Підставивши замість УВ логічний вираз мінімального січення

DE: $((V4=0) \text{ AND } (V5=0))$ і повторивши пп. 2 - 4 методики було отримано значення комбінації відмови модулів Е та D, яке становить:

$$Q_{DE} = 0,009;$$

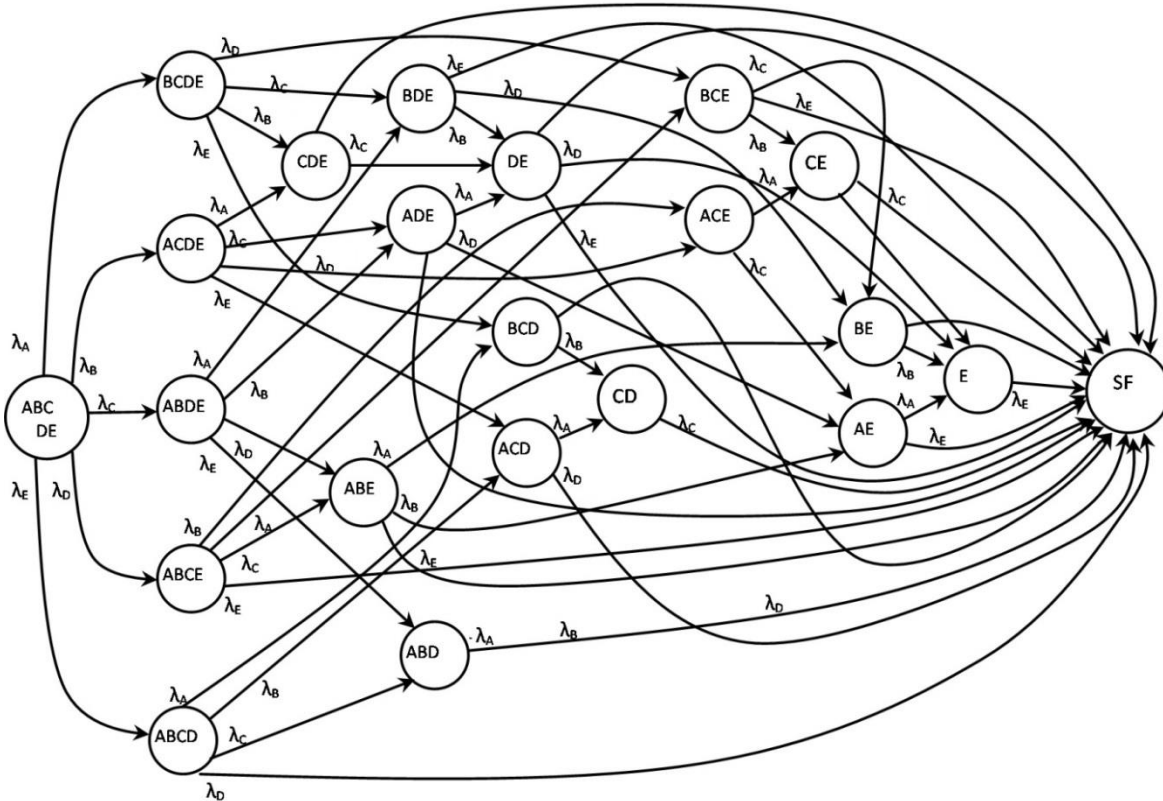


Рис.2 Граф станів та переходів

Аналогічно підставивши в УВ логічні вирази січень ACE та BCE отримаємо:

$$Q_{ACE} = 0,00084; \text{ та } Q_{BCE} = 0,00084;$$

Розраховані мінімальні січення показані в табл. 1.

Таблиця 1

Мінімальні січення системи

	Модулі, що відмовили	Кількість елементів, що відмовили	Значення мінімальних січень	Процентне значення, %
1	E, D	2	0,009	84,6
2	A, C, E	3	0,00084	7,92
3	B, C, E	3	0,00084	7,92

Верифікація розробленої методики

Для верифікації розробленої методики необхідно здійснити побудову дерева відмов для системи (рис.1) і обчислити значення ймовірності відмов для кожного мінімального січення та встановити розбіжність між результатами приведеними в табл.1 за умови, що результати отримані методом дерева відмов є точними.

Верифікація проводилась за допомогою спеціалізованого програмного комплексу RAM Commander фірми A.L.D. Service. За структурною схемою надійності було створено дерево відмов (рис. 3) та засобами RAM Commander отримано мінімальні січення, які приведено на рис. 4.

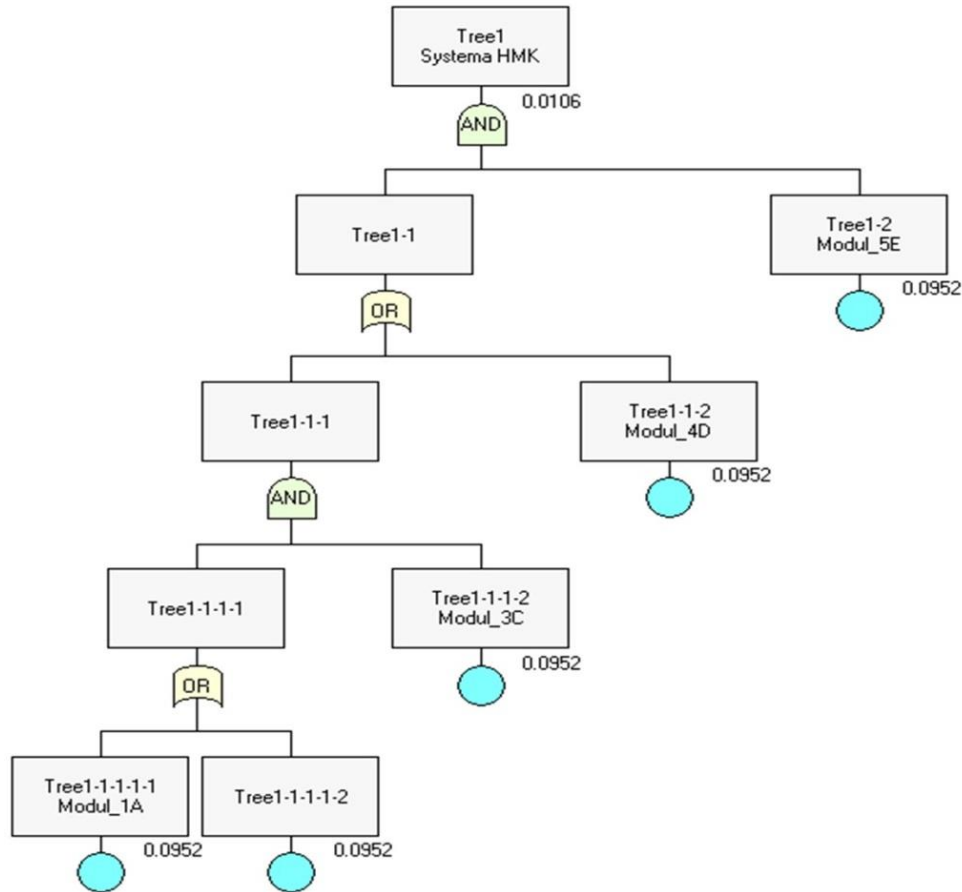


Рис.3. Дерево відмов

FTA - Minimal Cut Sets

Result for top event: $Q(\text{mean})=0.0106084$ FTA Name: Systema_HMK

Minimal Cut Sets: Number of MCS: 3 / 3 Order of MCS: Min 2 Max 3

N	Q(mean)	%	Or...	Event 1	Event 2	Event 3
1	0.00905592	84.0	2	Tree1-2	Tree1-1-2	
2	0.000861784	8.0	3	Tree1-2	Tree1-1-1-2	Tree1-1-1-1-2
3	0.000861784	8.0	3	Tree1-2	Tree1-1-1-2	Tree1-1-1-1-1

Рис.4. Мінімальні січення на основі дерева відмов

З проведеного дослідження видно, що розраховані значення мінімального січення в програмного комплексу RAM Commander співпадають із значеннями, отриманими в результаті використання методики побудови мінімальних січень на основі САМ. Отже, можна зробити висновок, що розроблена методика за удосконаленою технологією моделювання [3] забезпечує розрахунок мінімальних січень у автоматизованому режимі без побудови дерева відмов.

Висновки

1. При застосуванні розробленої методики мінімальні січення можна отримати на основі структурно-автоматної моделі без побудови дерева відмов.

2. При зміні структури чи поведінки системи дерево відмов необхідно повністю перебудувувати, а використовуючи дану методику потрібно лише внести відповідні зміни у множину формальних параметрів та дерева правил модифікацій структурно-автоматної моделі.

3. У разі доповнення структурно-автоматної моделі алгоритмом вибору мінімальних січень з сукупності станів відмови процес дослідження мінімальних січень стає повністю автоматизованим.

Література

1. Хенли Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска: Пер. с англ./ Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. — М. : Машиностроение, 1984. — 528 с.

2. Костерев В. В. Надежность технических систем и управление риском. — М. : МИФИ, 2008 — 280 с.

3. Волочий Б. Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем. — Львів: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2004. — 220 с.

4. S. A. Ericson II, Fault Tree Analysis By Design, Proceedings of 16th International System Safety Conference, 1998 — pp. 121—126,

5. Rodrigo de Queiroz Souza FMEA and FTA Analysis For Application of The Reliability Centered Maintenance Methodology: Case Study on Hydraulic Turbines / Rodrigo de Queiroz Souza, Alberto José Álvares //, ABCM Symposium Series in Mechatronics — Vol. 3 — P. 803—812.

6. Liggesmeyer P. Fault Tree analysis, Current Research Issues, Tutorial / Liggesmeyer P. Kaiser B. // SAFECOMP 2004, Potsdam 2004.

7. Singiresu S. Rao Reliability-Based Design / Singiresu S.Rao // McGraw-Hill — 1992. — p.569.

8. Половко А. М. Основы теории надёжности / Половко А. М., Гуров С. В. // БХВ-Петербург, 2006. — 704 с.

9. Bouissou, "Boolean logic Driven Markov Processes as an alternative to Event Trees", EDF R&D, Clamart, France — p. 81.

10. R. Allen Long Variants of Classical Cutsets Characterization, Proceedings of 21th International System Safety Conference, 2003 — pp. 396—406.

References

1. Henly E. Dzh., Kumamoto K. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i otsenka riska: Per. s anhl./ E.Dzh. Henly. M. : Mashynostoenie, 1984, 528 p.

2. Kosterev V. V. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i upravlenie riskom. M. : MIFI, 2008, 280 p.

3. Volochiy B. Yu. Tekhnolohiya modelyuvannya alhorytmiv povedinky informatsiynykh system. viv: Vyd-vo Natsionalnoho universytetu "L'vivska politekhnika", 2004, 220 p.

4. S. A. Ericson II, Fault Tree Analysis By Design, Proceedings of 16th International System Safety Conference, 1998, pp. 121-126,

5. Rodrigo de Queiroz Souza Alberto José Álvares. FMEA and FTA Analysis For Application of The Reliability Centered Maintenance Methodology: Case Study on Hydraulic Turbines. ABCM Symposium Series in Mechatronics, Vol. 3, pp. 803-812.
6. Liggesmeyer P. Kaiser B. Fault Tree analysis, Current Research Issues. SAFECOMP 2004, Potsdam 2004.
7. Singiresu S. Rao Reliability-Based Design. Mcgraw-Hill, 1992, p. 569.
8. Polovko A. M., Hurov S.V. Osnovy teorii nadezhnosti. BKhV-Peterburh, 2006, 704 p.
9. Bouissou, "Boolean logic Driven Markov Processes as an alternative to Event Trees", EDF R&D, Clamart, France, p. 81.
10. R. Allen Long Variants of Classical Cutsets Characterization, Proceedings of 21th Interantional System Safety Conference, 2003, pp. 396-406.

Волочій Б. Ю., Озірковський Л. Д., Мащак А. В., Шкілюк О. П., Кулик І. В. Методика розрахунку мінімальних січень для відмовостійких систем на основі структурно-автоматної моделі. У роботі представлено методику яка базується на основі удосконаленої технології моделювання. Дана технологія передбачає розробку структурно-автоматної моделі і далі в автоматизованому режимі будується граф станів та переходів, формується та розв'язується система диференційних рівнянь. В результаті отримується матриця інтенсивностей переходів з якої отримуються мінімальні січення. Дана методика представлена як альтернатива аналізу дерева відмов.

Ключові слова: надійність, дерево відмов, мінімальні січення, структурно-автоматна модель.

Волочій Б. Ю., Озірковский Л. Д., Мащак А. В., Шкілюк А. П., Кулык И. В. Методика расчета минимальных сечений для отказоустойчивых систем на основе структурно-автоматной модели. В работе представлена методика которая базируется на основе усовершенствованной технологии моделирования. Данная технология предусматривает разработку структурно-автоматной модели и далее в автоматизированном режиме строится граф состояний и переходов, формируется и решается система дифференциальных уравнений. В результате получается матрица интенсивностей переходов из которой получают минимальные сечения. Данная методика представлена как альтернатива анализа дерева отказов.

Ключові слова: надежность, дерево отказов, минимальные сечения, структурно-автоматная модель.

Volochii B. Y., Ozirkovskiy L. D., Mashchak A. V., Shkiliuk O. P., Kulyk I. V. Computation method of minimal cut sets for fault-tolerant systems based on structural-automatic model.

Introduction. The computation method of minimal cut sets for fault-tolerant structures based on structural-automatic model is presented in this work.

Method. The first step of this method is the development of binary structural-automatic model – formalized representation of system. Structural-automatic model is the data for program ASNA; and the state graph and transitions for the fault-tolerant system are formed in automatic mode. Also program model forms the system of differential equations Chapmen-Kolmogorov and solves it. The probability distribution in each state is gotten as the result of this calculation. Analyzing the list of states the minimal cut sets is calculated.

Conclusion. The alternative of fault tree analysis is showed in presented work. This method has automatic event so it is faster then fault tree analysis.

Keywords: reliability, fault tree, minimal cut sets, structural-automatic model.