УДК 519.873

Т. О. Стефанович, С. В. Щербовських
Національний університет "Львівська політехніка"

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КОРОТКОЧАСНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТА НЕРЕЗЕРВОВАНОЇ СИСТЕМИ НА ЇЇ НАДІЙНІСТЬ

https://doi.org/10.23939/istcipa2019.53.066

Мета. Розробити підхід до адекватної формалізації та обчислення надійності за допомогою динамічного дерева відмов для системи із двох елементів як взірцевої, з врахуванням короткочасного режиму роботи одного з елементів системи. **Методика.** Для формалізації надійності використано багатотермінальне динамічне дерево відмов. У такому дереві розділено структуру та поведінку системи. На основі дерева побудовано діаграму станів та переходів системи. Обчислення виконано за допомогою марковської моделі та на основі методу Монте-Карло. **Результати.** У роботі на прикладі системи із двох елементів, які сполучено послідовно, побудовано багатотермінальне динамічне дерево відмов. Таке дерево адекватно описує умову настання відмови системи, а також стани циклу короткочасного режиму роботи одного із елементів системи. У дереві задано динамічний зв'язок, який прив'язує параметри короткочасного режиму роботи до вказаного структурного елемента. Сформовано граф системи, який містить 6 станів та 6 переходів та подано таблицю із описом параметрів станів та переходів. На діаграмі непрацездатні стани згруповано у множини за причинами відмови системи. Ймовірнісні характеристики математичної моделі обчислено двома способами. Якщо параметри короткочасного режиму мають ймовірнісний характер, то використано марковську модель. Для випадку детермінованих параметрів короткочасного режиму використано моделювання методом Монте-Карло. Показано, що функція густини розподілу відмов має чітко виражені піки у моменти підвищеного зношування для детермінованої тривалості фаз короткочасного режиму. **Наукова новизна.** Удосконалено підхід на основі застосування багатотермінальних динамічних дерев відмов для моделювання надійності систем із послідовним сполученням елементів, які функціонують у короткочасних режимах роботи. **Практична значущість.** Запропонований підхід може бути використаний для оцінювання надійності під час проектування систем з вузлами, які функціонують у короткочасних режимах роботи. Одержані результати є математичною основою для аналізу короткочасних режимів роботи в системах із складною структурою.

Ключові слова: модель надійності, динамічне дерево відмов, метод Монте-Карло, короткочасний режим роботи.

Вступ. Постановка проблеми. Під час проектування обладнання виникає необхідність створювати окремі вузли, які функціонуватимуть в короткочасних режимах роботи. За таких режимів вузол більшу частину часу перебуває у ненавантаженому стані або вимкнений. Однак з метою виконання певної дії час від часу виникає потреба увімкнути такий вузол. Саме під час виконання дії відбувається основне зношування вузла. Більше того, вузол проектують таким чином, щоби його можливостей за потужністю або за нагріванням було достатньо тільки на таку коротко-часну роботу. Якщо вузол використовувати у навантаженому режимі довше, то він перегрівається і втрачає працездатність. Після виконання дії вузол переходить у ненавантажений стан або вимикається. Потреба у повторній дії виникає тоді, коли вузол встигає повністю остигнути. Зазвичай такими вузлами є приводні механізми, які урухомлюють потужні інерційні робочі органи. Сумарна тривалість роботи таких вузлів зазвичай становить від кількох секунд до кількох хвилин упродовж доби. Прикладами вузлів є система електричного пуску двигуна внутрішнього згорання, електромагнітна система відмикання електронного замка сейфа тощо.

Під час аналізу надійності обладнання, яке містить вузли, що функціонують у короткочасних режимах роботи, виникає проблема формалізування явища зміни навантаження та побудови адекватної моделі надійності. Зокрема, у такій моделі повинно враховуватися, що частина вузлів обладнання працює у номінальному режимі постійно, а частина переходить у такий режим лише у визначені моменти часу. Зауважимо, що на цьому етапі досліджень обслуговування такого обладнання не розглядається.

Аналіз літературних джерел. Аналіз та формалізація надійності технічних систем, в яких відбуваються складні динамічні процеси, є важливою проблемою, яку розглядають у науковій літературі. Для формалізації таких проблем пропонують використовувати різні типи динамічних дерев відмов. Зокрема, в [1] пропонують спеціальну модель, а саме динамічний графік невизначених причин, у якому поєднані дерева відмов із деревами подій. У [2] розглянуто підхід, який ґрунтується на використанні звичайних динамічних дерев відмов із подальшою побудовою на їх основі простору станів. У [3] використано для формалізації збоїв, складної поведінки за навантаженням та часом тимчасові оператори (“Gate”), які злучаються або пропускаються залежно від режиму роботи системи. Недоліками описаних вище підходів є те, що частину динамічних явищ, зокрема короткочасні режими роботи деяких елементів системи, не вдається адекватно описати використовуючи запропоновані модифікації дерев відмов. У [4] запропоновано прогнозувати надійність на основі збирання поточної інформації про систему та виконанні он-лайн аналізу. Недолік підходу полягає у тому, що боротьба із проблемою появи відмови відбувається на етапі експлуатації, нехтуючи етапом проектування. В [5] обговорюються можливості методу Монте-Карло для прогнозування надійності систем. Недоліком підходу є складність формалізації надійності на початковому етапі.

Мета. Розробити підхід до адекватної формалізації та обчислення надійності за допомогою динамічного дерева відмов для системи із двох елементів як взірцевої, з врахуванням короткочасного режиму роботи одного з елементів системи.

Методика проведення досліджень. *Опис системи.* Для пошуку підходу до формалізації надійності обрано систему з двох елементів. Елемент 1 функціонує у тривалому режимі роботи, а елемент 2 – у короткочасному. Непрацездатність системи виникає у випадку відмови будь-якого із її елементів, тобто структурна схема надійності є послідовним сполученням елементів (рис. 1).

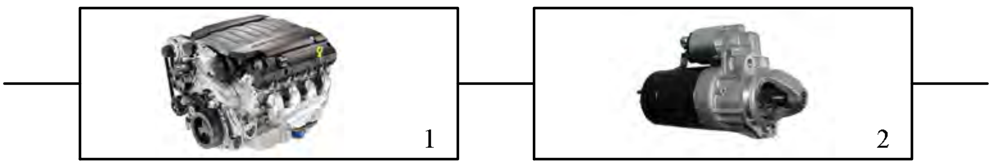

Рис. 1. Структурна схема надійності системи

Fig. 1. Reliability block diagram of the system

Вважаємо, що відновлення елементів системи повністю відсутнє. Таке спрощення застосовано для того, щоб зосередитись на аналізі впливу короткочасних режимів роботи на надійність системи. У подальших дослідженнях це обмеження планується усунути.

Вважаємо, що напрацювання до відмови обох елементів системи розподілено експоненційно із параметрами λ_1 та λ_2, відповідно. Оскільки перший елемент функціонує у тривалому режимі роботи, то його зношування відбувається рівномірно впродовж усього часу експлуатації. Натомість, другий елемент унаслідок короткочасного режиму роботи зношується циклічно. Тобто, впродовж проміжку часу τ_1 відбувається інтенсивне зношування цього елемента, яке за величиною є співвимірним із зношуванням першого елемента. З іншого боку, впродовж часу τ_2 зношування другого елемента відбувається зі зменшеною на коефіцієнт k інтенсивністю. Проміжки інтенсивного та зниженого зношування повторюються циклічно, як показано на діаграмі навантаження (рис. 2). Тривалість цих проміжків може бути як детермінованою величиною, так і випадковою.

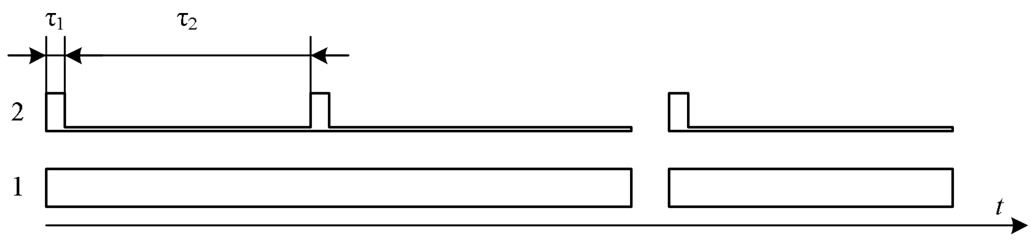

Рис. 2. Діаграма навантаження елементів системи

Fig. 2. Load diagram of the components of the system

Динамічне дерево відмов. Для формалізації надійності системи сформуємо багатотермінальне динамічне дерево відмов на основі структурної схеми надійності. Таку модель складено із двох дерев, як показано на рис. 3. Перше дерево визначає умову непрацездатності системи, а друге – умову появи навантаження у короткочасному режимі роботи.

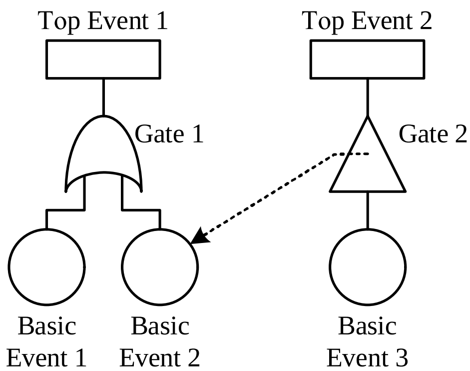

Рис. 3. Багатотермінальне динамічне дерево відмов системи

Fig. 3. K-terminal dynamic fault tree of the system

Непрацездатність системи позначено блоком “Top Event 1”. Така подія виникає, якщо відмовив хоча б один із елементів системи, що описано операцією OR у блоці “Gate 1”. Непрацездатність першого елемента позначено блоком “Basic Event 1”, а непрацездатність другого позначено блоком “Basic Event 2”. Поява навантаженого режиму позначена блоком “Top Event 2”. Логічний стан появи цього режиму передається через повторювач логічного сигналу “Gate 2” від блока “Basic Event 3”. Блок “Basic Event 3” означає статус та параметри короткочасного режиму роботи. Якщо настає фаза інтенсивного зношування, то на виході блоку формується логічний сигнал True, а у протилежному випадку – False. Зміна фаз відбувається почергово згідно із параметрами діаграми навантаження.

У моделі задано динамічний зв’язок, який сполучає блок “Gate 2” другого дерева із блоком “Basic Event 2” першого дерева. Цей зв’язок вказує, що короткочасний режим роботи стосується другого елемента. Параметри динамічного зв’язку задано у блоці “Gate 2” у формі логічної умови. Зокрема, якщо другий елемент у короткочасному режимі перебуває у фазі зниженого зношування, тобто із блока “Gate 2” надходить сигнал False, то його навантаження зменшується у k разів відносно базового.

Діаграма станів та переходів системи. На підставі розробленого багатотермінального динамічного дерева відмов побудовано граф станів та переходів системи (рис. 4). Діаграма містить шість станів та шість переходів. У графі круг, яким позначено стан системи, поділено на два сектори. Верхній сектор відповідає станам системи (блок “Top Event 1”). Якщо система перебуває у працездатному стані, то сектор зафарбовано білим кольором, якщо у непрацездатному – сірим. Нижній сектор відповідає фазам короткочасного режиму (блок “Top Event 2”). Якщо другий елемент перебуває у фазі зниженої інтенсивності зношування, то сектор зафарбовано білим кольором, якщо у фазі підвищеного зношування – сірим.

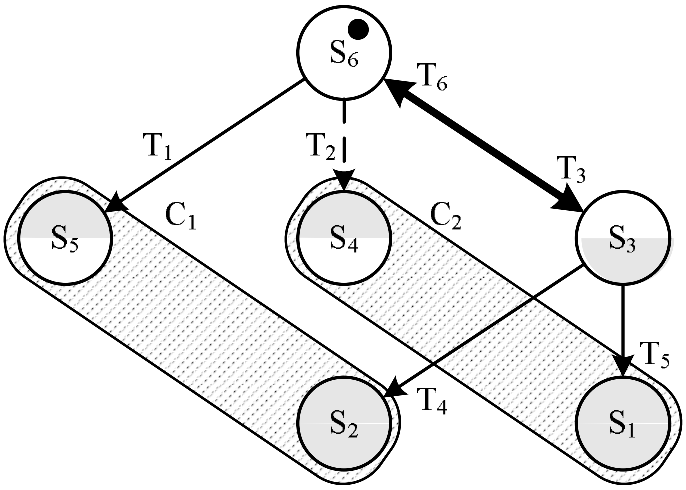

Рис. 4. Діаграма станів та переходів системи

Fig. 4. State and transition diagram of the system

Переходи T_1 та T_4 відповідають відмові першого елемента, переходи T_2 та T_5 – відмові другого елемента, переходи T_3 та T_6 – чергуванню фаз короткочасного режиму роботи. За причинами відмови стани системи розділено на дві множини. Множина станів S_2 та S_5 відповідає непрацездатності системи внаслідок відмови першого елемента, а множина станів S_1 та S_4 – непрацездатності системи внаслідок відмови другого елемента. У таблиці подано детальний аналіз усіх станів та переходів системи.

Опис станів та переходів системи

Description of states and transitions of the system

Стани						Переходи		
Назва	Номер “Basic Event”			Номер “Top Event”		Назва	Номер “Basic Event”, яка закінчується	Назва кінцевого стану
	1	2	3	1	2			
S_6	1	$1/k$	1	True	True	T_1	1	S_5
						T_2	2	S_4
						T_3	3	S_3
S_5	0	0	0	False	True	–	–	–
S_4	0	0	0	False	True	–	–	–
S_3	1	1	0	True	False	T_4	1	S_2
						T_5	2	S_1
						T_6	3	S_6
S_2	0	0	0	False	False	–	–	–
S_1	0	0	0	False	False	–	–	–

Результати досліджень та їх обговорення. Ґрунтуючись на графі станів та переходів системи, побудовано обчислювальні моделі такої системи. Зокрема, якщо тривалості фаз короткочасного режиму є випадковими величинами, то для моделювання надійності застосовано марковську модель. Наближено тривалості фаз описано експоненціальним розподілом із параметрами $1/\tau_1$ та $1/\tau_2$, відповідно. Якщо тривалості фаз є детермінованими величинами, то для моделювання надійності застосовано метод Монте-Карло. Тривалості фаз описані регулярними процесами із параметрами τ_1 та τ_2, відповідно. Усі обчислення виконано в умовних одиницях часу для випадку, якщо кінцевий час розрахунку становить t = 1. Призначимо параметрам такі значення. Інтенсивність відмов першого елемента, який функціонує у режимі постійного навантаження, дорівнює одиниці λ_1 = 1. Інтенсивність відмов другого елемента, який функціонує у короткочасному режимі, залежить від фази цього режиму. Якщо елемент перебуває у фазі інтенсивного зношування, то λ_2 = 1 000, а якщо у фазі зниженого зношування, то λ_2 = 1. Для відображення такої особливості для динамічного зв'язку задано параметр k = 1/1 000. Параметри короткочасного режиму задано як τ_1 = 0.1 та τ_2 = 0.000 01. Це означає, що впродовж усього часу функціонування може відбутись 10 циклів навантаженого режиму із щільністю фази інтенсивного зношування 1:10 000.

Обчислення марковської моделі виконано чисельним методом, призначеним для розв'язування жорстких систем диференціальних рівнянь. Для методу Монте-Карло вибрано 100 000 ітерацій, а величина кроку відображення встановлена 1 000.

На рис. 5, *а* подано криві ймовірності безвідмовної роботи системи, а на рис.5, *б* – криві функції густини розподілу відмов. На обох фрагментах суцільна лінія 1 відповідає характеристикам, обчисленим за марковською моделлю, а ступінчаста крива 2 – характеристикам, обчисленим методом Монте-Карло.

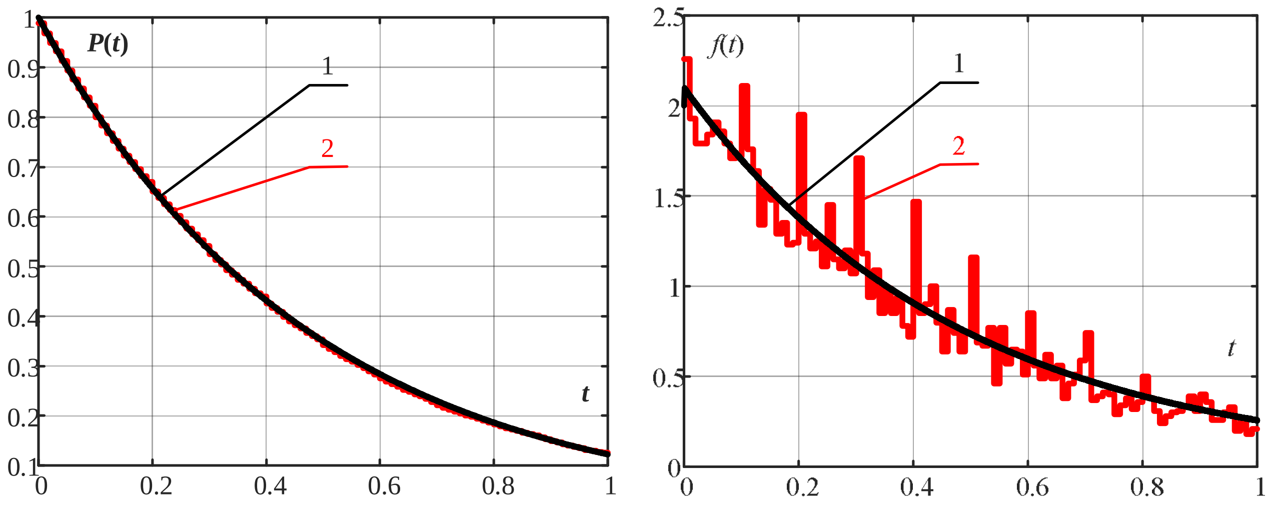

Рис. 5. Ймовірнісні характеристики системи:
а – ймовірність безвідмовної роботи; б – густина розподілу відмов

Fig. 5. Probability characteristics of the system:
a – reliability function; b – failure density function

Функції ймовірності безвідмовної роботи, одержані обома методами, цілком узгоджуються між собою, незалежно від типу розподілу тривалості фаз короткочасного режиму роботи. Натомість, функція густини розподілу відмов має чітко виражені піки у моменти підвищеного зношування для детермінованої тривалості фаз короткочасного режиму.

Перевагою запропонованого підходу є простота математичної моделі на основі динамічного дерева відмов для врахування короткочасного режиму роботи системи із двох та більше елементів, які з'єднані послідовно з погляду надійності.

Недолік підходу полягає у тому, що така модель не зможе забезпечити коректного результату для усього діапазону зміни параметрів. Це пов'язано із обмеженнями на числове інтеґрування, які мають жорсткі системи рівнянь.

Запропонований підхід є перспективним завдяки можливості його розширення на складні за структурою системи, а також на вивчення взаємовпливу короткочасного режиму роботи на інші явища, пов'язані із перерозподілом навантаження.

Загрозами підходу є скорочення діапазону параметрів, за яких не виникатиме критична жорсткість рівнянь із збільшенням структурної складності та взаємодією із резервами за навантаженням.

Висновки. *Р*озроблено математичний підхід для врахування впливу зміни навантаження елемента, який функціонує у короткочасному режимі роботи, на надійність усієї системи. Умову відмови системи, а також цикли короткочасного режиму роботи математично описано багатотермінальним динамічним деревом відмов. У такому дереві задано динамічне явище, яке зв'язує параметри короткочасного режиму роботи із вказаним структурним елементом. Сформовано граф системи, який містить 6 станів та 6 переходів. Ймовірнісні характеристики математичної моделі обчислено двома способами: на основі марковської моделі та на основі методу Монте-Карло. Показано вплив короткочасного режиму роботи на функцію густини розподілу відмов системи.

1. Zhou Z. Model Event/Fault Trees with Dynamic Uncertain Causality Graph for Better Probabilistic Safety Assessment / Z. Zhou, Q. Zhang // IEEE Trans. on Reliability. – 2017. – Vol. 66, No. 1. – P. 178–188. doi: 10.1109/TR.2017.2647845.
2. Volk M. Fast Dynamic Fault Tree Analysis by Model Checking Techniques / M. Volk, S. Junges, J. Katoen // IEEE Trans. on Industrial Informatics. – 2018. – Vol. 14, No. 1. – P. 370–379. doi: 10.1109/TII.2017.2710316.
3. Ammar M. Towards an Accurate Probabilistic Modeling and Statistical Analysis of Temporal Faults via Temporal Dynamic Fault-Trees (TDFTs) / M. Ammar, G. Bany Hamad, O. Ait Mohamed, Y. Savaria // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 29264–29276. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2902796
4. Zeng Z. Dynamic Risk Assessment Based on Statistical Failure Data and Condition-Monitoring Degradation Data / Z. Zeng, E. Zio // IEEE Trans. on Reliability. – 2018. – Vol. 67, No. 2. – P. 609–622. doi: 10.1109/TR.2017.2778804.
5. Liu B. Monte Carlo Reliability Model for Single-Event Transient on Combinational Circuits / B. Liu, L. Cai // IEEE Trans. on Nuclear Science. – 2017. – Vol. 64, No. 12. – P. 2933–2937. doi: 10.1109/TNS.2017.2772267.

T. Stefanovych, S. Shcherbovskykh
Lviv Polytechnic National University

MODELING THE INFLUENCE OF SHORT-TERM MODE OF COMPONENT FOR NON RESERVED SYSTEM ON ITS RELIABILITY

Aim. To develop an approach for adequately formalizing and calculating reliability using a dynamic fault tree for a two-component system as an example, taking into account the short-term mode of operation of one of the system component. **Method.** A *k*-terminal dynamic fault tree is used to formalize reliability. In this tree, the structure and behavior of the system are separated. On the basis of the tree the diagram of states and transitions of the system is developed. The calculations are performed using a Markov model and on the basis Monte-Carlo simulation. **Results.** In the example of a two-element system that is connected in series, a *k*-terminal dynamic failure tree is developed. Such tree adequately describes the failure condition of the system, as well as the state of the cycle of short-term mode of operation of one of the system component. A dynamic link is specified in the tree that binds the short-term mode parameters to the specified structural component. A graph of a system containing 6 states and 6 transitions is formed and a table describing the state and transition parameters is presented. In the diagram, the inoperable states are grouped into sets of system failure causes. The probabilistic characteristics of the mathematical model are calculated in two ways. If the parameters of the short-term mode are probabilistic, then the Markov model is used. Monte Carlo simulation was used for the case of deterministic parameters of short-term mode. It is shown that the failure density function has clearly described peaks at moments of increased wear for the determined duration of the short-term mode phases. **Scientific novelty.** Improved approach based on the use of *k*-terminal dynamic failure trees to model the reliability of systems with series-connected components that function in short-term modes. **Practical significance.** The proposed approach can be used to evaluate the reliability when designing systems with nodes that operate in short-term modes. The results obtained are a mathematical basis for the analysis of short-term modes of operation in systems with complex structures.

Key words: reliability model, dynamic fault tree, Monte-Carlo simulation, short-term mode of a work.

1. Z. Zhou and Q. Zhang, “Model Event/Fault Trees With Dynamic Uncertain Causality Graph for Better Probabilistic Safety Assessment”? in IEEE Transactions on Reliability, vol. 66, no. 1, pp. 178–188, March 2017. doi: 10.1109/TR.2017.2647845.
2. M. Volk, S. Junges and J. Katoen, “Fast Dynamic Fault Tree Analysis by Model Checking Techniques”, in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 1, pp. 370–379, Jan. 2018. doi: 10.1109/TII.2017.2710316.
3. M. Ammar, G. Bany Hamad, O. Ait Mohamed and Y. Savaria, “Towards an Accurate Probabilistic Modeling and Statistical Analysis of Temporal Faults via Temporal Dynamic Fault-Trees (TDFTs),” in IEEE Access, vol. 7, pp. 29264–29276, 2019.
4. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2902796
5. Z. Zeng and E. Zio, “Dynamic Risk Assessment Based on Statistical Failure Data and Condition-Monitoring Degradation Data”, in IEEE Transactions on Reliability, vol. 67, no. 2, pp. 609–622, June 2018. doi: 10.1109/TR.2017.2778804.
6. B. Liu and L. Cai, “Monte Carlo Reliability Model for Single-Event Transient on Combinational Circuits”, in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 64, no. 12, pp. 2933–2937, Dec. 2017. doi: 10.1109/TNS.2017.2772267.