

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-4-80-84>

УДК 621.397

Новак А.О., Лаптева І.С., Дейнека К.О.
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ В ПРОЦЕСІ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація. У статті розроблено методику та алгоритми формування оптимальних множин елементів, які беруть участь в процесі моделювання відмов-відновлень складних технічних об'єктів. Вибір множин елементів, що відмовляють і відновлюються, базується на ієрархічній конструктивній структурі складного технічного об'єкта, а також показниках безвідмовності, ремонтпридатності і вартості його елементів, блоків та вузлів. Наведено опис математичної моделі процесів витрачання та поповнення ресурсу угруповання складних технічних об'єктів. На додаток до розглянутого авторами раніше опису моделі введено формалізований опис угруповання, який включає до себе безліч технічних об'єктів угруповання; нормативні параметри витрачання та поповнення ресурсу об'єктів і поточний стан угруповання. Сформовані оптимальні множини елементів використовуються для розрахунку прогностичних показників надійності і вартості експлуатації самого об'єкта. На прикладі показано, як від вибору множин елементів, що відмовляють і відновлюються, змінюються прогностичні оцінки надійності і вартості експлуатації складного технічного об'єкта.

Ключові слова: складний технічний об'єкт, ієрархічна конструктивна структура, середнє напрацювання на відмову, питома вартість експлуатації, імітаційне статистичне моделювання.

Novak Alina, Laptieva Iryna, Deineka Karyna
Military Institute of Telecommunications and Informatization

DETERMINATION OF OPTIMAL SOLUTIONS IN THE PROCESS OF MODELING COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

Summary. The article describes the methodology and algorithms for the formation of optimal sets of elements that are involved in the process of modeling failures-restorations of complex technical objects. The choice of sets of failing and restoring elements is based on the hierarchical structural structure of a complex technical object, as well as the indicators of failure, maintainability and cost of its elements, blocks and units. The description of the mathematical model of the processes of spending and replenishing the resource grouping of complex technical objects is given. In addition to the previously described model description, a formalized grouping description was introduced, which includes many technical grouping objects; normative parameters of spending and replenishment of object resources and current state of grouping. The grouping status is determined by the state of the resource of the technology included in the grouping. The resource of an individual object is determined by three parameters: the actual resource (residual operating time), the remaining service life and the remaining number of planned repairs that must be performed at this facility before it is written off. Formed optimal sets of elements are used to calculate the predicted reliability and cost of operation of the object itself. Methods and algorithms for the formation of optimal sets of elements that are involved in the modeling of failures-restorations of complex technical objects are developed. The choice of sets of failing and restoring elements is based on the hierarchical structural structure of a complex technical object, as well as the indicators of failure, maintainability and cost of its elements, blocks and units. Formed optimal sets of elements are used to calculate the predicted reliability and cost of operation of the object itself. The example shows how from the choice of sets of failing and restoring elements, the predicted estimates of reliability and cost of operation of a complex technical object. The example shows how from the choice of sets of failing and restoring elements, the predicted estimates of reliability and cost of operation of a complex technical object.

Keywords: complex technical object, hierarchical structural structure, average failure time, specific cost of operation, simulation statistical modeling.

Постановка проблеми. Життєві функції держав, промислових підприємств усього суспільства забезпечуються функціонуванням складних технічних об'єктів. До таких об'єктів відносяться електростанції, виробничі лінії, системи зв'язку та навігації, транспортні засоби, комп'ютерні системи тощо. З усього різноманіття таких об'єктів може бути відокремлена група, яка включає складні відновлювані технічні об'єкти, які мають ієрархічну конструктивну структуру і призначені для довготривалих операцій. Типовими прикладами таких об'єктів є об'єкти електричного та радіоелектронного обладнання, наприклад, радіолокаційні станції, елементи автоматизованих систем управління тощо, які з точки зору надійності є об'єктами, що

підлягають відновленню. Такі об'єкти характеризуються високою ціною, як при розробці, так і в експлуатації. Для забезпечення необхідного (заданого) рівня надійності в процесі експлуатації проводиться їх технічне обслуговування. Потреба в технічному обслуговуванні базується на своєчасній заміні елементів, що знаходяться в стані попереднього відмови, що призводить до підвищення надійності. Ремонт виконується з метою відновлення справного або експлуатаційного стану об'єкта або його частини [1]. Розглянуті об'єкти характеризуються певними особливостями, які впливають і ускладнюють завдання побудови математичних моделей для оцінки та прогнозування показника надійності (RI), а також експлуатаційних витрат (OC) цих

об'єктів на всіх етапах їх життєвого циклу. Крім того, ці об'єкти постійно піддаються модернізації протягом різних періодів розвитку та експлуатації життєвого циклу, тому вони потребують постійних уточнень прогнозування РІ та ОК. Такі об'єкти є досить складними, насамперед у значенні великої кількості (десятки та сотні тисяч) та різноманітності типів складових елементів. Отже, метод імітаційного статистичного моделювання здебільшого використовується для оцінки та прогнозування РІ та об'єкта з урахуванням їх конструктивної структури [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання про те, як конструктивна структура технічного об'єкта впливає на його РІ та ОС, недостатньо вивчена. Для розробника складного технічного об'єкта дуже важливо мати інструменти (методи) для кількісного визначення цього ефекту та використовувати його при прийнятті певних конструктивних рішень щодо прогнозування РІ та ОС. Велика кількість досліджень присвячена обчисленню та прогнозуванню надійності, а також створенню моделей (включаючи імітаційні). У статті [3] пропонується метод успадкування та розробка сучасних методів оцінки надійності, заснованих на чисельному моделюванні, на основі динамічних байєсівських мереж та чисельного моделювання. Таким чином, він долає обмеження аналітичного методу та методу багаторівневого синтезу, а також забезпечує ефективний інструмент для оцінки надійності складних динамічних систем. У статті [4] пропонується метод обчислення надійності конструкції на основі графіків.

У роботі [5] представлений метод MEMS моделювання надійності конструкції, а також описаний метод FORM для отримання РІ та його чутливості до випадкових вхідних значень та їх параметрів, які не тільки можуть бути використані для оцінки надійності об'єкта, але і для сприяння визначенню ключові фактори додаткових структурних удосконалень. У статті [6] запропоновано метод оцінки надійності механізму, сумісного з бістабілізмом, з урахуванням деградації та невизначеності параметрів. У статті [7] пропонується розширена модель коваріації Вейбулла-Корозія для оцінки надійності системи, що відповідає робочим напругам. В [8] була розроблена модель динамічної надійності з циклічним періодом багаторазових завдань для невідновлюваних дискретних систем. У роботі [9] розроблені алгоритми для оцінки надійності системи у вигляді байєсівських мереж з експоненціально зростаючою кількістю даних, яку потрібно зберегти у міру збільшення кількості компонентів системи. У статті [10] пропонується комбінаційний метод аналізу надійності багатоваріантної системи. Метод заснований на поєднанні моделей BDD та MMDD. У [11; 12] пропонується використовувати байєсівський сепарапараметричний підхід для отримання показників надійності для багаторівневих ієрархічних систем як з паралельним, так і з послідовним з'єднанням компонентів. Надійність багаторівневих ієрархічних систем також обговорюється в роботі, яка присвячена проблемі визначення вимоги надійності структурних елементів системи з метою забезпечення заданого рівня надійності всієї системи з мінімальним загальним показником вартість товару.

У цих роботах докладно описана методологія визначення показників надійності системи для заданого набору елементів, що відмовляються, та їх характеристик. Однак завдання дослідження скорочення набору елементів, що виійшли з ладу (збільшення елементів), з урахуванням ієрархічної конструктивної структури та її впливу на зміни надійності та цінності об'єкта в цілому не розглядалося. Також не вирішена проблема визначення оптимального набору відновлюваних елементів. Таким чином, представляє значний інтерес розробка методології та алгоритмів формування оптимальних наборів відмовних та відновлюваних елементів, які беруть участь у процесі моделювання показників надійності та експлуатаційних витрат складного технічного засобу.

Мета статті. Метою роботи є розробка методики визначення оптимальних наборів відмовних та відновлюваних елементів у відновлюваних складних технічних об'єктах різного призначення. Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

- розробити алгоритм попереднього формування набору відмовних елементів E_0 та набору відповіностей W між елементами, що відмовляються та відновлюються;
- розробити алгоритм усунення можливої надмірності множини E_0 ;
- розробити алгоритм остаточного формування множини W .

Виклад основного матеріалу. Для вирішення завдань дослідження використовувались такі методи:

- імовірнісне моделювання та елементи теорії графів (для визначення РІ та ОС на основі конструктивної структури об'єкта);
- моделювання статистичного моделювання (для отримання прогнозних оцінок РІ та ОС об'єкта);
- методи математичної статистики (для перевірки точності моделі).

Конструктивна структура об'єкта та структура його надійності. Наступні показники розглядаються як параметри надійності та експлуатаційних витрат:

T_0 – середній час між відмовами (РІ);

T_R – середній час відновлення (індекс ремонтпридатності);

C_o – операційна вартість одиниці (індекс ОС).

Вартість експлуатації розуміється у вузькому розумінні – враховується лише вартість замієних елементів, ремонтних робіт та використаних витратних матеріалів. У [1] розроблена імітаційна статистична модель (SSM), яка допомагає отримати прогнозні оцінки для РІ та ОС. Початкові дані для SSM – це параметри об'єкта, які можна узагальнити як вираз (1):

$$P_{gen} = \{G, R_e, M, C\}$$

де P_{gen} – узагальнений параметр, який представляє характеристики об'єкта; G – графік, що описує конструктивну структуру об'єкта; R_e , M і C – це узагальнені параметри, що характеризують властивості надійності, ремонтпридатності (ремонтпридатності) та вартості об'єкта. Більш детальний зміст цих параметрів буде розглянуто нижче. Конструктивна структура об'єкта описується графіком (деревом) $G : G = \{ER\}$, де

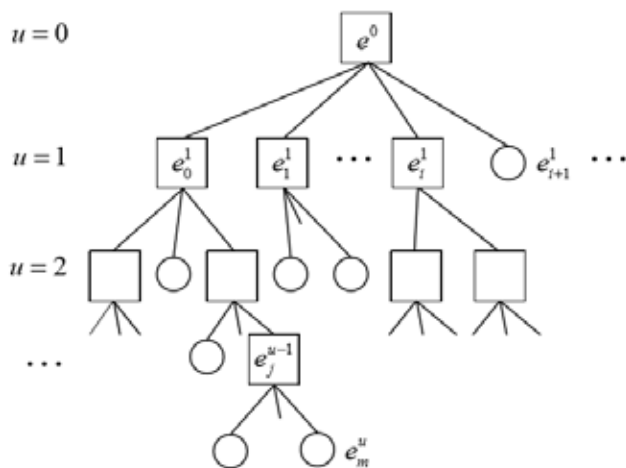


Рис. 1. Дерево конструктивної структури об'єкта

E – сукупність вершин графа, що представляють окремі елементи об'єкта; R – сукупність ребер, що з'єднують ці вершини. Множина R визначає відношення гніздування конструктивних елементів. Довільний конструктивний елемент буде позначатися через u , тобто, де u – індекс конструктивного рівня елемента (рівень вкладення), i – індекс елемента. Номер конструктивного рівня підраховується з кореневої вершини e_0 графа, що представляє об'єкт у цілому. Відношення R – це сукупність пар $1 \dots, - u i j e e$, в яких елемент $1 - u j e$ вкладений в елемент u . Кожна пара 1 являє собою відповідний край на графіку G , показано на рис. 1.

Елементи, що містять інші елементи, будуть називатися складовими елементами. Якщо склад елементів не деталізований (в його складі не визначено інших конструктивних елементів), то такий елемент буде називатися простим. Простий елемент насправді може бути довільним складним технічним продуктом, але в конкретному випадку ми не зацікавлені в його внутрішній побудові. На рис. 1 складові елементи показані у вигляді прямокутників, а прості елементи – як кола. На нижньому рівні конструктивної структури розміщені всі прості елементи.

Глибина деталізації при побудові графіка G повинна бути такою, щоб усі потенційно змінні та замінні в процесі експлуатації елементи були представлені на цьому графіку. На найнижчо-

му рівні повинні бути представлені найдрібніші елементи, розбирання яких в умовах експлуатації неможливо або недоцільно.

Структурна схема надійності об'єкта послідовно паралельна. Усі елементи множини вважаються з'єднаними послідовно в сенсі надійності. Кожен представлений елемент у графі G може представляти групу рядів або паралельно пов'язаних однакових елементів. Паралельне з'єднання елементів насправді є структурною надмірністю. Надлишок у групах може бути завантажений (постійний) або вивантажений (замінуючи).

Для прогнозування надійності та експлуатаційних витрат складного технічного об'єкта на стадії його проектування або модернізації пропонуємо підхід, заснований на зменшенні (розширенні) набору відмовних елементів E_0 , які враховуються при розрахунку надійності показники. З цією метою була розроблена методика визначення оптимальних наборів несправних та відновлюваних елементів складного технічного об'єкта. Методологія базується на ієрархічній конструктивній структурі об'єкта, враховує надмірність елементів, що виходять з ладу, а також ремонтпридатність елементів виробу та їх вартість, що відрізняє цю методологію від відомих. Структурно методологія реалізована у вигляді набору трьох алгоритмів:

- алгоритм попереднього формування множини відмовних елементів E_0 та набір відповідей між відмовними та відновлюваними елементами W ;

- алгоритм усунення можливої надмірності безлічі E_0 ;

- алгоритм остаточного формування множини W , тоді як множина всіх відновлюваних елементів ER формується неявно через множину (відношення) W .

Висновки і пропозиції. Для підтвердження надійності розроблених методів та алгоритмів проведено комп'ютерне моделювання за допомогою програмного продукту ISMPN. Отримані результати підтверджують вплив параметрів ремонту об'єкта на обчислені (оптимальні) набори E_0 та ER , а також на прогнозні оцінки RI та OC об'єкта: з поліпшенням властивості ремонтпридатності прогнозовані значення показників T_0 та TR відповідно покращуються. Поліпшення показника Se не є обов'язковим; за умови різних вхідних даних, таке покращення може не відбутися.

Список літератури:

1. Шеннон Р.Е. Симуляція систем: мистецтво та наука / Р.Е. Шеннон. – Prentice Hall, 1975. – 368 с.
2. Браун Дж. Про коріння багаточленних надійних поліномів / Дж. Браун, Л. Моль // Дискретна математика. – 2017. – Вип. 340(6). – С. 1287–1299.
3. Лянг Х.Ф. Оцінка надійності військових кораблів на основі динамічних байєсівських мереж та чисельного моделювання / Х.Ф. Лянг, Х.Д. Ванг, Х. Йі, Д. Лі // Океанічна інженерія. – 2017. – Вип. 136. – С. 129–140.
4. Ту Х. Структурне моделювання надійності механізму замикання в пристрої на основі MEMS безпеки та озброєння / Х. Ту, У. Лу, З. Соня, Ю. Цян // Досягнення інженерного програмного забезпечення. – 2017. – Вип. 108. – С. 48–56.
5. Ву Дж. Механізм надійності бістабільних сумісних механізмів з урахуванням деградації та невизначеності: Метод моделювання та оцінки / Дж. Ву, С. Ян, Дж. Лі, Ю. Гу // Прикладне математичне моделювання. – 2016. – Вип. 40(23-24). – С. 10377–10388.
6. Окаро І.А. Аналіз надійності та оптимізація системи стиснення підводного моря, що стикається з експлуатаційними коваріатними напруженнями / І.А. Окаро, Л. Тао // Інженерія надійності та безпека системи. – 2016. – Вип. 156. – С. 159–174.
7. Куй Л. Надійність для дискретних державних систем з періодами циклічних місій / Л. Куй, Ю. Лі, Дж. Шен, К. Лін // Прикладне математичне моделювання. – 2016. – Том 40, Випуски 23-24. – С. 10783–10799.
8. Тянь І. Алгоритми моделювання мереж Байєса та оцінки надійності інфраструктурних систем / І. Тянь, А. Дер Кіурегян // Інженерія надійності та безпека системи. – 2016. – Вип. 156. – С. 134–147.

9. Ying Yi Li, Ying Chen, Zeng Hui Yuan, Ning Tang, Rui Kang. Аналіз надійності багатодержавних систем, що залежать від механізму залежності механізму відмови на основі комбінованого методу // Інженерія надійності та безпека системи. – 2017. – Вип. 166. – С. 109–123. doi: 10.1016/j.res.2016.11.007
10. Лі М. Пропорційне моделювання небезпеки для ієрархічних систем з багаторівневим агрегуванням інформації / М. Лі, К. Ху, Дж. Лю // ПЕ транзакції. – 2014. – Вип. 46(2). – С. 149–163.
11. Лі М. Байєсовське моделювання багатодержавних ієрархічних систем з багаторівневим агрегуванням інформації / М. Лі, Дж. Лю, Дж. Лі, Б.У. Кім // Інженерія надійності та безпека системи. – 2014. – Вип. 124. – С. 158–164.
12. Гришко А. Аналіз надійності складних систем на основі динаміки ймовірності відмов підсистеми та відхилення параметрів / А. Гришко, Н. Юрков, Н. Горячев // 2017. 14-та міжнародна конференція Досвід проектування та застосування Системи САПР в мікроелектроніці (CADSM), 2017. – С. 179–182.

References:

1. Shannon, R.E. (1975). *Simulyatsiya sistem: mistetstvo ta nauka* [Systems Simulation: Art and Science]. Prentice Hall, p. 368.
2. Braun, Dzh. (2017). Pro korinnya bagatochlennikh nadiynikh polinomiv [On the roots of polynomials of reliable polynomials]. *Diskretna matematika*, vol. 340(6), pp. 1287–1299.
3. Lyaang, X.F., Vang, Kh.D., Kh. Yi, & D. Li (2017). Otsinka nadiynosti viys'kovikh korabliv na osnovi dinamichnikh bayesivs'kikh merezh ta chisel'nogo modelyuvannya [Reliability assessment of warships based on dynamic Bayesian networks and numerical modeling]. *Okeanichna inzheneriya*, vol. 136, pp. 129–140.
4. Kh. Tu, U. Lu, Z. Sonya, & Yu. Tsian (2017). Strukturne modelyuvannya nadiynosti mekhanizmu zamikannya v pristroi na osnovi MEMS bezpeki ta ozbroennya [Structural modeling of the reliability of the locking mechanism in a device based on MEMS security and weapons]. *Dosyagnennya inzhenerogo programnogo zabezpechennya*, vol. 108, pp. 48–56.
5. Vu, Dzh (2016). Mekhanizm nadiynosti bistabiznikh sumisnikh mekhanizmiv z urakhuvannyam degradatsii ta neviznachenosti: Metod modelyuvannya ta otsinki [Mechanism of reliability of bistable compatible mechanisms considering degradation and uncertainty: Modeling and estimation method]. *Prikladne matematichne modelyuvannya*, vol. 40(23-24), pp. 10377–10388.
6. Okaro, I.A., & Tao L. (2017). Analiz nadiynosti ta optimizatsiya sistemi stisnennya pidvodnogo morya, shcho stikaetsya z ekspluatatsiynimi kovariatnimi napruzhennyami [Reliability analysis and optimization of the submarine compression system facing operational covariate stresses]. *Inzheneriya nadiynosti ta bezpeka sistemi*, vol. 156, pp. 159–174.
7. Kuy, L. (2016). Nadiynist' dlya diskretnikh derzhavnikh sistem z periodami tsiklichnikh misiiv [Reliability for discrete state systems with cycle missions]. *Prikladne matematichne modelyuvannya*, T. 40, vol. 23-24, pp. 10783–10799.
8. Tyan', I. (2016). Algoritmi modelyuvannya merezh Bayesa ta otsinki nadiynosti infrastrukturnikh sistem [Algorithms for Bayesian network modeling and reliability assessment of infrastructure systems]. *Inzheneriya nadiynosti ta bezpeka sistem*, vol. 156, pp. 134–147.
9. Ying Yi Li, Ying Chen, Zeng Hui Yuan, Ning Tang, Rui Kang (2017). Analiz nadiynosti bagatoderzhavnikh sistem, shcho zalezhat' vid mekhanizmu zalezhnosti mekhanizmu vidmovi na osnovi kombinovanogo metodu [Reliability analysis of multi-state systems depending on the mechanism of dependence of the mechanism of failure based on the combined method]. *Inzheneriya nadiynosti ta bezpeka sistemi*, vol. 166, pp. 109–123.
10. Li, M. (2014). Proportsiynne modelyuvannya nebezpeki dlya ierarkhichnikh sistem z bagatorivnevimi agreguvannyami informatsii [Proportional Hazard Modeling for Hierarchical Systems with Multilevel Information Aggregation]. *PE tranzaktsii*, vol. 46(2), pp. 149–163.
11. Li, M. (2014). Bayesovs'ke modelyuvannya bagatoderzhavnikh ierarkhichnikh sistem z bagatorivnevimi agreguvannyami informatsii [Bayesian modeling of multi-state hierarchical systems with multilevel information aggregation]. *Inzheneriya nadiynosti ta bezpeka sistemi*, vol. 124, pp. 158–164.
12. Grishko, A., Yurkov, N., & Goryachev, N. (2017). Analiz nadiynosti skladnikh sistem na osnovi dinamiki ymovirnosti vidmov pidsystemi ta vidkhilennya parametrov [Reliability analysis of complex systems based on the dynamics of subsystem failure probability and parameter deviation]. *14-ta mizhnarodna konferentsiya Dosvid proektuvannya ta zastosuvannya Sistemi SAPR v mikroelektronitsi* (CADSM), pp. 179–182.