5. Бурштинська, Х. В. Теоретичні та методологічні основи цифрового моделювання рельєфу за фотограмметричними та картографічними даними [Текст]: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.24.02 / Х. В. Бурштинська. – Львів, 2003. – 226 с.

6. Бурштинська, Х. В. Порівняльний аналіз побудови цифрових моделей рельєфу з використанням апроксимаційних функцій [Текст] / Х. В. Бурштинська // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2001. – Вип. 61. – С. 137–148.

7. Бурштинська, Х. В. Дослідження точності побудови цифрових моделей рельєфу на основі картографічних даних [Текст] / Х. В. Бурштинська, О. С. Заяць // Вісник геодезії і картографії. – 2002. – № 2. – С. 26–31.

8. Бурштинська, Х. В. Теоретичні основи та експериментальні дослідження математичних функцій для побудови цифрових моделей рельєфу [Текст] / Х. В. Бурштинська, О. С. Заяць // Вісник геодезії і картографії. – 2002. – № 4. – С. 32–37.

9. Бурштинська, Х. В. Застосування сплайн-функцій для побудови цифрових моделей рельєфу [Текст]: конференція / Х. В. Бурштинська, О. С. Заяць. – «Кадастр, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології і перспективи розвитку». – Краків, 2001. – С. 2.5.–2.11.

10. Островський, А. В. Перспективи використання сучасних геодезичних технологій у вирішенні задач вертикального планування. Вип. 53 [Текст]: наук.-техн. збірник / А. В. Островський. – К.: КНУБА, 2014. – С. 374–382.

References

1. Venttsel, E. S. (1964). Teoriya veroyatnostey [Probability theory]. Moscow: Nauka, 576.

2. Zazulyak, P. M., Gavrish, V. G., Evseeva, E. M., Yosipchuk, M. D. (2007). Osnovi matematichnogo opratsyuvannya geodezichnih vimiryuvan [Fundamentals of mathematical processing of geodetic measurements]. Lviv: Rastr – 7, 408.

3. Pryaha, B. G., Bilec'kij, Ja. V. (2003). Pro tochnist geodezichnih vimiryuvan [About precision geodetic measurements]. Visnik geodeziyi ta kartografyi, 3 (30), 43–49.

4. Kolmogorov, A. N. (1974). Osnovnyie ponyatiya teorii veroyatnostey [Basic concepts of probability theory]. Moscow: Nauka, 119.

5. Burshtinska, H. V. (2003). TeoretichnI ta metodologichni osnovi tsifrovogo modelyuvannya relefu za fotogrammetrichnimi ta kartografIchnimi danimi [Theoretical and methodological basis of digital terrain modeling for photogrammetric and cartographic data]. Lviv, 226.

6. Burshtinska, H. V. (2001). Porivnyalniy analiz pobudovi tsifrovih modeley relefu z vikoristannyam aproksimatsiynih funktsiy [Comparative analysis of digital elevation models using approximating functions]. Geodeziya, kartografiya i aerofotoznimannya, 61, 137–148.

7. Burshtinska, H. V., Zayats, O. S. (2002). Doslidzhennya tochnosti pobudovi tsifrovih modeley relefu na osnovi kartografichnih danih [Study accuracy of digital elevation models based on mapping data]. Visnik geodeziyi ta kartografyi, 2, 26–31.

8. Burshtinska, H. V., Zayats, O. S. (2002). Teoretichni osnovi ta eksperimentalni doslidzhennya matematichnih funktsIy dlya pobudovi tsifrovih modeley relefu [The theoretical basis and experimental study of mathematical functions to build digital elevation models]. Visnik geodeziyi ta kartografyi, 4, 32–37.

9. Burshtinska, H. V., Zayats, O. S. (2001). Zastosuvannya splayn-funktsIy dlya pobudovi tsifrovih modeley relefu [The use of spline functions for building digital elevation models]. «Kadastr, fotogrammetriya, geoinformatika – suchasni tehnologiyi i perspektivi rozvitku». Krakiv, 2.5.–2.11.

10. Ostrovskiy, A. V. (2014). Perspektivi vikoristannya suchasnih geodezichnih tehnologiy u virishenni zadach vertikalnogo planuvannya Vol. 53 [Prospects of using modern surveying technology in solving problems of vertical planning]. Kyiv: KNUBA, 374–382.

Дата надходження рукопису 22.12.2015

Островський Аполлінарій Вікторович, аспірант, кафедра інженерної геодезії, Київський національний університет будівництва і архітектури, пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03680
E-mail: naokakao@rambler.ru

Шульц Роман Володимирович, доктор технічних наук, професор, кафедра інженерно геодезії, Київський національний університет будівництва і архітектури, пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03680
E-mail: r-schultz@mail.ru

УДК 004.052.001.57
DOI: 10.15587/2313-8416.2016.58713

ІНОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА СТРУКТУРНОЇ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ ТЕХНІЧНИХ ОБЄКТІВ

© О. С. Савєльєва

Запропоновано інформаційну технологію для оцінювання структурної надійності технічних об'єктів, структура яких відповідає одному з відомих типів нейронних мереж. В структурі технології міститься інформаційна морфологічна модель, яка дозволяє здійснювати формування та зміну структури моделі досліджуваного об'єкта за правилами, що ґрунтуються на визначенні ймовірності безвідмовної роботи в теорії надійності

Ключові слова: *відмовостійкість, надійність технічних об'єктів, морфологічна модель, інформаційна технологія*

It is proposed the information technology for evaluating the structural reliability of technical objects, the structure of which corresponds to one of the known types of neural networks. Structure of the information technology contains morphological model that allows for the formation and change in the structure of the object model being studied by the rules, based on the determination of the probability of failure-free operation in reliability theory
Keywords: *fault tolerance, reliability of technical objects, morphological model, information technology*

1. Вступ

Розрахунок надійності як комплексної властивості технічного об'єкта, яка відображає його спроможність зберігати відповідні якісні показники протягом всього періоду експлуатації, є процедурою встановлення значень цих показників з використанням методів, що базуються на їх визначенні за довідниковими даними про надійність елементів об'єкта, даними про надійність об'єктів-аналогів, даними про властивості матеріалів та іншої інформації, яку може отримати спеціаліст на момент розрахунку. Особливістю є зв'язок надійності зі всіма етапами проектування, виготовлення і роботи технічного об'єкта, починаючи від моменту, коли здійснюється обґрунтування технічного рішення по його створенню і закінчуючи підготовкою акта списання [1–3]. На кожному із етапів вирішуються технологічні, конструктивні та інші питання, які стосуються забезпечення необхідного рівня надійності об'єкта з найменшими витратами часу і засобів. Так, закладання надійності об'єкта здійснюється на етапі проектування і розрахунку, коли розробляється конструкція машини та її вузлів; визначається структурна схема; встановлюються матеріали, система змащування, пристосованість до ремонту та обслуговування; визначаються методи захисту від шкідливого впливу тощо. Забезпечується необхідний рівень надійності при виготовленні. Тут важливим є якість деталей та вузлів, методи контролю та випробувань готової продукції, можливість управління технологічним процесом. Основні рішення, які прийняті на цих двох етапах безпосередньо позначаються на експлуатаційних властивостях технічного об'єкта [3–5]. Основною проблемою при оцінюванні надійності машин є використання таких джерел інформації про зміни працездатності і застосування таких методів розрахунку, які дозволили б прогнозувати поведінку машини в різних умовах експлуатації.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сучасні технічні об'єкти є складними системами. Вони мають велику кількість різнорідних елементів зі складною ієрархічною системою взаємодії один із одним [6–8]. Водночас, вимоги до ефективності функціонування і якості технічних об'єктів стають все жорсткішими, адже вихід з ладу будь-якого об'єкта (елемента системи) може призвести до значних матеріальних втрат внаслідок недовипуску продукції, порушення ритмічності технологічного процесу, втрат сировини, необхідності проведення ремонтних робіт [4].

Вирішення задач надійної роботи полягає в реалізації системного підходу до її забезпечення на всіх етапах життєвого циклу об'єкта. Застосування єдиного інформаційного простору, який задовольняє вимогам CALS-технологій, постановка задач оптимального проектування, планування і обслуговування, застосування і розробка відповідного математичного апарату дає можливість описати всю технологію створення і експлуатації технічних систем на протязі їх життєвого циклу [7–9]. Однак, у всіх випадках доводиться враховувати відсутність необхідного простого і доступного математичного і програмного апарату, оскільки пропоновані сучасні підходи до вирішення питань визначення показників надійності орієнтовані на окремі етапи життєвого циклу системи і не враховують взаємного впливу задач етапів проектування і експлуатації [6, 9, 10], а також потребують значних часових та фінансових витрат на отримання необхідної для цього інформації, що є неприйнятним ані в сучасному проектуванні, ані в сучасному управлінні, оскільки різко звужує можливість аналізу варіантів конструкцій, технологій виготовлення, діагностики та режимів експлуатації складних систем в режимі реального часу [11].

Моделювання складних систем дозволяє досліджувати особливості їх функціонування за різних умов неповноти і неоднорідності початкової інформації про надійність їх елементної бази [6, 9, 11]. Правильний вибір структури моделі складної системи забезпечує не тільки оптимальний підбір обладнання, але й дозволяє прогнозувати витрати, наприклад, на купівлю обладнання, проведення ремонтів чи гарантувати відмовостійкість системи на протязі необхідного проміжку часу .

Для таких систем процес проектування пов'язаний з великою кількістю дискретних операцій вибору серед різних типів поєднання компонентів на основі їх надійності чи ваги в загальній відмовостійкості системи, а оптимізація, за наявності підсистем з резервуванням *k*-із-*n*, є *NP*-складною задачею [8, 12–14]. Тому методи прямого перебору варіантів можуть виявитися занадто тривалими в часі [15]. В роботі [11] запропоновано використовувати нейронні мережі для оцінювання ймовірності безвідмовної роботи як окремих елементів, так і підсистем моделі складної системи за умови, що її структура відповідає одному з відомих типів нейронних мереж. Перевагою використання нейронних мереж є їх достатня ефективність моделювання для випадків нелінійної і статистично значимої взаємодії [9, 16–18]. Недоліком – є необхідність наявності для їх навчання коректних навчальних і тестових вибірок.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єктом дослідження є процес оцінювання структурної надійності технічних об'єктів, які можуть бути представлені нейроподібною моделлю.

Метою роботи є підвищення ефективності процесу проектування та забезпечення підтримки прийняття рішень на віх етапах життєвого циклу

шляхом вибору структури технічного об'єкта на основі розробленої інформаційної технології визначення показника структурної відмовостійкості.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі.

1. Розроблення процедури визначення та вибору показника структурної відмовостійкості технічного об'єкта.

2. Побудова інформаційної структурної статистичної моделі визначення імовірності безвідмовної роботи систем з навантаженим резервуванням, яка полягає у поділі простору моделювання на рівні і одержанні відповідних значень показника структурної відмовостійкості системи.

4. Інформаційна технологія визначення показника структурної відмовостійкості

Для підтримки прийняття рішень при визначенні надійності структури технічного об'єкта, що є особливо значимою процедурою на етапі створення нового об'єкта, попередню оцінку надійності структури пропонується здійснювати за величиною показника структурної відмовостійкості K_{CB} [11]. Вибір такого показника – складне і неоднозначне завдання, оскільки відмовостійкість, в загальному випадку, є функцією не тільки варіанту проектного або управлінського рішення, але і умов майбутньої експлуатації об'єкта – часто непередбачуваних. Приймаючи до уваги, що потужність множини розсіювання значень ймовірності безвідмовної роботи $P(n)$ залежить від кількості елементів в системі N та від кількості елементів, що відмовили n, для оцінювання структурної відмовостійкості складної системи з урахуванням конкретних ситуацій при діагностиці, проектуванні та експлуатації об'єкта моделювання, спеціаліст може скористуватися, зокрема наступними виразами для його визначення:

– степеневим (для великих N і невеликого розсіювання точок)

$$K_{CB\text{стр}} = \frac{1}{N}\int_0^N P(n)dn; \quad 0 \le n \le N;$$

– логістичним (для великих N і великого розсіювання точок)

$$K_{CB\text{лог}} = \frac{1}{N}\int_0^N \frac{a_1}{1+a_2 e^{-a_3 n}}dn; \quad 0 \le n \le N;$$

– логарифмічним (для розсіювання з чітко вираженими зонами)

$$K_{CB\text{лог}} = -\log_2\left(n^* - 1\right)\cdot \sum_{n=n^*}^{n^{**}} \log_2 P(n)$$

або ентропійним

$$K_{CB\text{E}} = \sum_{n=n^*}^{n^{**}} \left[P(n)\log_2 P(n) - \left(1-P(n)\right)\log_2\left(1-P(n)\right)\right],$$

тут a_i – коефіцієнти, n^* і n^{**} – границі умовної зони, в якій система при певному наборі пошкоджень елементів зберігає працездатність з ненульовою ймовірністю.

Для одержання значення K_{CB}, таким чином, необхідно виконати статистично обґрунтовану кількість експериментів на структурно однотипних системах, в однакових умовах навантаження. Загальна схема процесу отримання K_{CB} за допомогою інформаційної технології, яка містить інформаційну морфологічну модель (ІММ) у вигляді нейроподібної мережі, яка дозволяє автоматично змінювати її структуру за правилами, які грунтуються на визначенні імовірності безвідмовної роботи в теорії надійності, показана на рис. 1.

Інформаційна структурна статистична модель (ІССМ) дозволяє повести статистичний експеримент в режимі реального часу, видаляючи на кожному наступному кроці по одному елементу із структури моделі і розрахувати показник за середньостатистичною величиною ймовірності безвідмовної роботи. В цьому випадку пошкодження структури реалізується на модельному рівні.

Важливою відмінною особливістю роботи ІММ є те, що вона навчається розпізнавати образи, які не мають структурного чи параметричного відношення до об'єкту моделювання. Спільне в них міститься тільки в самій моделі: між об'єктом і ІММ (що, власне, і робить ІММ математичною моделлю об'єкта) існує морфологічна подібність матриць елементів і зв'язків між ними. Інформаційна єдність між об'єктом та його моделлю досягається на морфологічному рівні внаслідок їх структурної єдності.

При цьому дослідник сам може встановлювати межі необхідної відмовостійкості об'єкта. Наприклад, може бути встановлено, що, коли ІММ правильно розпізнає образ, наприклад, більш ніж в 50 % від загальної кількості експериментальних випадків, то і модельований об'єкт працездатний, якщо ж модель правильно розпізнає образ менш, ніж у 50 % випадків, то модельований об'єкт відмовив.

Таким чином, побудова ІММ для подальшого використання при оцінюванні відмовостійкості системи починається з надання їй початкової структурної подоби об'єкту моделювання. Але у всіх випадках робота з даною технологією можлива лише у випадках, коли структуру модельованого об'єкта можна представити у вигляді будь-якої з існуючих нейронних мереж.

Після створення структури ІММ, її навчають, наприклад, розпізнавати образи. Інформаційна структурна статистична модель, в яку ІММ вбудована як основний процесор, здійснює експеримент, вносить зміни в ІММ і при цьому кожний раз визначає та фіксує її стан (рис. 2).

Реальний об'єкт працює в умовах конкретних параметрів елементів і заданої величини навантаження. При цьому, за умовою побудови ІССМ, користувач не втручається в налаштування ваг елементів моделі, вони встановлюються в результаті навчання останньої. Запропонована інформаційна технологія дозволяє здійснювати порівняння структур функціонально однакових, але структурно різних варіантів об'єкта [18].

Для врахування діючих навантажень структуру ІММ доповнюють додатковими входами, на які пода-

ють дані про навантаження або додатковими ваговими коефіцієнтами, пропорційними штатним навантаженням на об'єкт. Інформація щодо величини штатного навантаження дозволяє розширити можливості запропонованої інформаційної технології, і окрім підтримки прийняття рішень щодо структурної схеми складного технічного об'єкту вирішувати під задачу перевірки адекватності моделі, якщо така необхідність виникає в результаті реалізації технології порівняння.

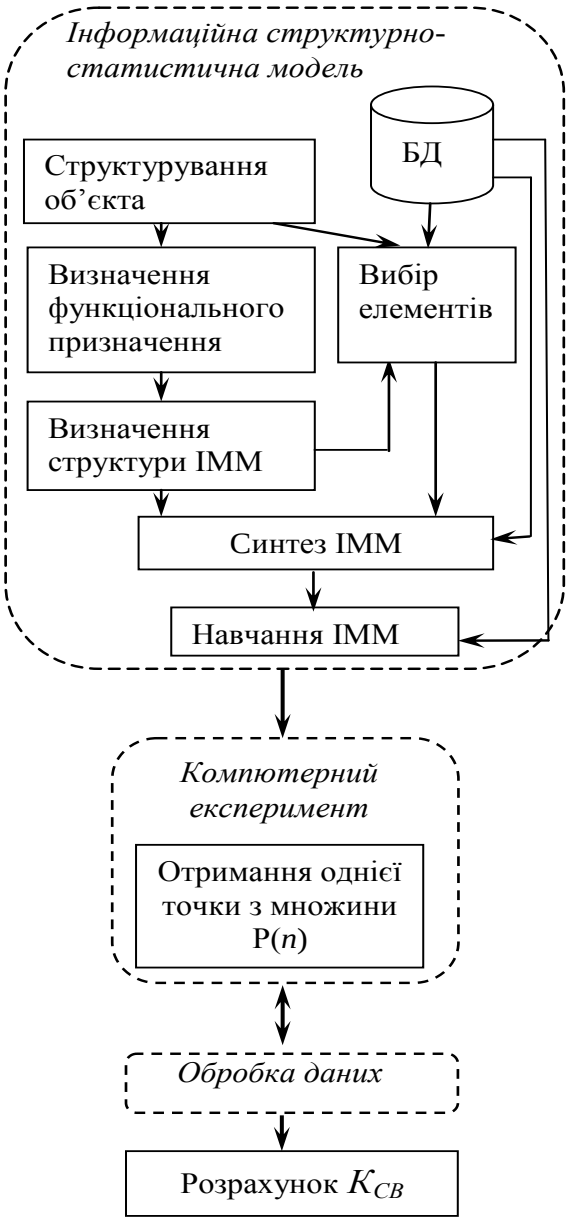

Рис. 1. Загальна схема інформаційної технології процесу отримання $K_{СВ}$

Для цього у складі методу працює блок прогнозування ушкоджень, які виникають протягом майбутнього життєвого циклу, наприклад, за фактом зміни стану або вичерпання деякого ресурсу, заснований на матричному аналізі та марковських моделях.

Таким чином, ІССМ реалізує ще й можливість порівнювати варіанти структури розроблюваного технічного об'єкта на протязі їх прогнозованої тривалості експлуатації.

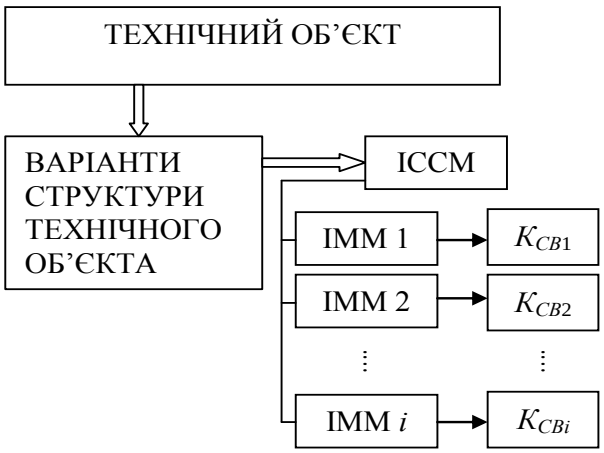

Рис. 2. Схема одержання значень показника в результаті комп'ютерного експерименту

5. Обговорення результатів

В результаті отримуємо додатковий інструмент для підтримки прийняття рішень при проектуванні. Однак запропонована інформаційна технологія визначення показника структурної відмовостійкості може бути застосована і для інших областей, що базуються на зміні структури об'єкта протягом його життєвого циклу.

Зокрема її підходи можуть бути застосовані для управління навантаженням при експлуатації складних механічних конструкцій. Завдання управління за $K_{СВ}$ (або завдання стабілізації) можна сформулювати наступним чином: в міру зміни структури об'єкта розраховувати та здійснювати деякий керуючий вплив на зовнішнє навантаження, який відновлює (стабілізує) значення показника структурної відмовостійкості $K^*_{СВ}$ (до тих пір, доки це можливо з урахуванням резервування системи). Приклад схеми такого управління представлено на рис. 3.

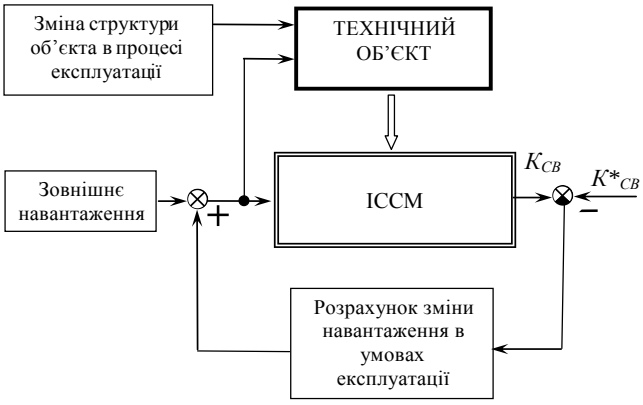

Рис. 3. Приклад стабілізації за рахунок зміни навантаження в результаті збільшення відмов елементів об'єкта

За допомогою ІССМ величину зниження розраховують таким чином, щоб зберегти початкове значення $K_{СВ}$, яке одержують після кожного пошкодження. Поступове пошкодження об'єкта призводить до того, що розрахункове значення $K_{СВ}$ при номінальному навантаженні $F_{ном}$ (1, рис. 4) постійно знижується (2, рис. 4). При перерахунку навантаження піс-

ля кожного з пошкоджень (3, рис. 4) є можливість здійснювати (до деякого моменту) підтримку близького до початкового значення $K_{СВ}$ (4, рис. 4), а отже і зберігати первинну відмовостійкість об'єкту.

Розрахунок зміни навантаження після кожної відмови елемента виконували методом підбору, попередньо виконавши дискретизацію величини діючого навантаження.

В якості ще одного прикладу застосування представленої інформаційної технології можна запропонувати метод планування ремонтів технічних об'єктів з навантаженим резервуванням, який полягає в оптимізації сумарного показника структурної відмовостійкості до і після ремонту.

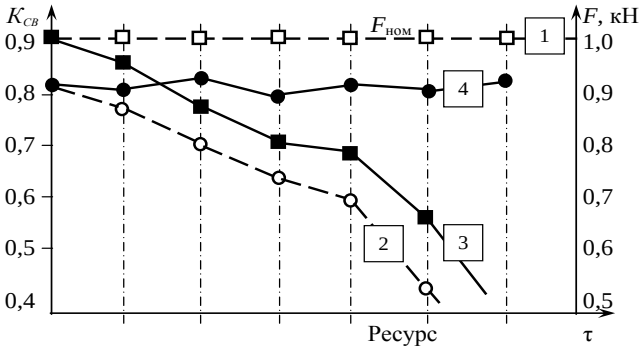

Рис. 4. Результат управління (стабілізації) показника структурної відмовостійкості за рахунок зміни навантаження в міру пошкодження елементів: □, ■ – навантаження; ○, ● – $K_{СВ}$

Повторне навчання «пошкодженої» ІССМ робить її знову «цілою», але з меншою кількістю елементів і зв'язків між ними порівняно з початковою (рис. 5).

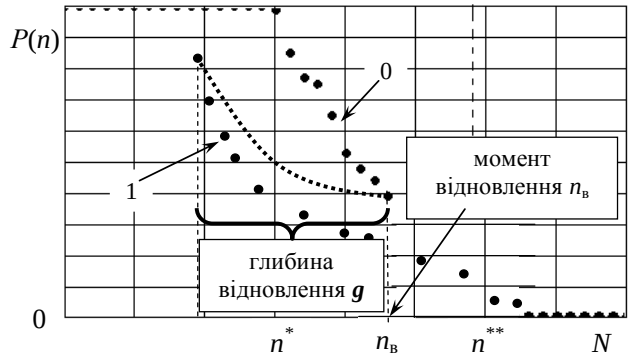

Рис. 5. Приклад постановки задачі планування ремонтних робіт: 0 – до ремонту; 1 – після ремонту з повторним навчанням

Таким чином, повторне навчання в міру пошкодження, сприяє збереженню працездатності ІССМ, до певної межі, а саме, до таких рівнів пошкоджень, при яких не навчена повторно мережа стає непрацездатною.

Користуючись ІММ, підбирали такі значення n для ремонту і таку глибину останнього, які забезпечуватимуть максимальну величину $K_{СВ}$. Результат такого підбору фактично є проектом здійснення ремонтно-відновлювальних робіт.

6. Висновки

В результаті, для зведення багатовимірного критеріального простору аналізу та синтезу складних систем до одновимірного запропоновано обчислювані в реальному часі показники структурної відмовостійкості складних систем з навантаженим резервуванням: логістичний, логарифмічний, степеневий і ентропійний. Ці показники одержують за допомогою інформаційної морфологічної моделі, яка дозволяє автоматично змінювати її структуру за правилами, які ґрунтуються на визначенні імовірності безвідмовної роботи в теорії надійності. На основі запропонованого методу створено інформаційну технологію порівняння структур функціонально однакових, але структурно різних варіантів об'єкта, на вхід якої надходять запропоновані варіанти структури останнього і штатне навантаження на об'єкт.

Література

1. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем [Текст] / И. А. Рябинин. – СПб: СПбГУ, 2007. – 326 с.

2. Оборский, Г. А Построение эффективных систем управления надежностью сложных технических систем [Текст] / Г. А. Оборский // Тр. Одесс. политехн. ун-та. – 2000. – Вып. 1. – С. 27–30.

3. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем [Текст] / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.

4. Краснянский, М. Н. Надежность функционирования процессов и аппаратов многоассортиментных химических производств [Текст] / М. Н. Краснянский. – М.: Машиностроение, 2010. – 116 с.

5. Савєльєва, О. С. Застосування показника структурної відмовостійкості в задачах проектування [Текст] / О. С. Савєльєва, О. М. Красножон, О. Ю. Лебедєва // Праці Одеськ. політехн. ун-ту. – 2014. – Вип. 2. – С. 130–135. doi: 10.15276/opu.2.44.2014.24

6. Куюнджич, С. М. Разработка и анализ моделей надежности и безопасности систем [Текст] / С. М. Куюнджич. – М.: Физматлит, 2001. – 463 с.

7. Ball, M. O. Network Reliability [Text] / M. O. Ball, C. J. Colbourn, J. S. Provan. – Network Models, 1995. – P. 673 – 762. doi: 10.1016/s0927-0507(05)80128-8

8. Кочкаров, А. А. Обеспечение стойкости сложных систем. Структурные аспекты [Текст] / А. А. Кочкаров, Г. Г. Малинецкий. – Москва, 2005. – 32 с.

9. Shier, D. R. Network Reliability and Algebraic Structures [Text] / D. R. Shier. – Oxford: Clarendon Press, 1991. – 144 p.

10. Бибик, Т. В. Оценка сетевой надежности при структурном проектировании сложных технических систем [Текст] / Т. В. Бибик, Д. А. Пурич, О. С. Савельева // Високі технології в машинобудуванні. – 2010. – Вип. 1 (20). – С. 18–21.

11. Савельева, О. С. Экспресс-модель надежности сложных систем в САПР [Текст] / О. С. Савельева // Праці Одеськ. політехн. ун-ту. – 2011. – Вип. 2 (36). – С. 174–178.

12. Wood, R. K. Triconnected decomposition for computing K-terminal network reliability [Text] / R. K. Wood // Networks. – 1989. – Vol. 19, Issue 2. – P. 203–220. doi: 10.1002/net.3230190203

13. Aboelfotoh, H. M. F. Series-parallel bounds for the two-terminal reliability problem [Text] / H. M. F. Aboelfotoh, C. J. Colbourn // ORSA Journal on Computing. – 1989. – Vol. 1, Issue 4. – P. 209–222. doi: 10.1287/ijoc.1.4.209

14. Скворцов, М. С. Методика оптимизации надежности систем с сетевой структурой [Текст] / М. С. Сквор-

цов // Труды СПИИРАН. – 2011. – Вып. 1 (16). – С. 231–242. – Режим доступа: http://www.szma.com/skvortsov_1.pdf

15. Gordeyev, V. Method and Programmer for Calculation of Large-Span Spatial Symmetrical Structures Using Personal Computer [Text] / V. Gordeyev, V. Basenko, G. Vozgrina, E. Minkovich. – Innovative Large Steel Structures. Concept, Design, Construction. – Montreal, Canada, 1992. – P. 627–639.

16. Colbourn, C. J. The combinatorics of network reliability [Text] / C. J. Colbourn. – N. Y.: Oxford Univ. Press, 1987. – 160 p.

17. Секерин, А. Б. Метод оценки устойчивости нейронно-сетевых моделей [Текст] / А. Б. Секерин // Электронный журнал «Исследовано в России». – 2005. – С. 350–354. – Режим доступа: http://masters.donntu.org/2009/kita/stolyar/library/01.pdf

18. Савельева, О. С. Применение энтропийного показателя при поддержке принятия решений на этапе проектирования строительных конструкций [Текст] / О. С. Савельева // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2015. – № 11. – С. 63–68.

References

1. Riabinin, I. A. (2007). Nadiezhost i bezopasnost strukturno-clozhuh system. Stankt-Petersburg, 326.

2. Oborskiy, G. A. (2000). Postroenie effektivnyih sistem upravleniya nadezhnostyu slozhnyih tehnicheskih sistem. Tr. Odess. politehn. un-ta, 1, 27–30.

3. Dillon, B., Singh, C. (1984). Inzhenernyie metodyi obespecheniya nadezhnosti sistem. Moscow: Mir, 318.

4. Krasnyanskiy, M. N. (2010). Nadezhnost funktsionirovaniya protsessov i apparatov mnogoassortimentnyih himicheskih proizvodstv. Moscow. Mashinostroenie, 116.

5. Savelyeva, O. S., Krasnozhon, O. M., Lebedeva, O. U. (2014). Using the structural fault-tolerance index in project designing. Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi, 2, 130–135. doi: 10.15276/opu.2.44.2014.24

6. Kuyundzhich, S. M. (2001). Razrabotka i analiz modeley nadezhnosti i bezopasnosti system. Moscow: Fizmatlit, 463.

7. Ball, M. O., Colbourn, C. J., Provan, J. S. (1995). Network reliability. Network Models, 673–762. doi: 10.1016/s0927-0507(05)80128-8

8. Kochkarov, A. A., Malinetskiy, G. G. (2005). Obespechenie stoykosti slozhnyih sistem. Strukturnyie aspektyi. Moscow, 32.

9. Shier, D. R. (1991). Network Reliability and Algebraic Structures. Oxford: Clarendon Press, 144.

10. Bibik, T. V., Purich, D. A., Saveleva, O. S. (2010). Otsenka setevoy nadezhnosti pri strukturnom proektirovanii slozhnyih tehnicheskih sistem. Visoki tehnologiyi v mashinobuduvanni, 1 (20). 18–21.

11. Saveleva, O. S. (2011). Ekspress-model nadezhnosti slozhnyih sistem v SAPR. Pratsi Odesk. politehn. un-tu, 2 (36). 174–178.

12. Wood, R. K. (1989). Triconnected decomposition for computingK-terminal network reliability. Networks, 19 (2), 203–220. doi: 10.1002/net.3230190203

13. Aboelfotoh, H. M., Colbourn, C. J. (1989). Series-Parallel Bounds for the Two-Terminal Reliability Problem. ORSA Journal on Computing, 1 (4), 209–222. doi: 10.1287/ijoc.1.4.209

14. Skvorcov, M. S. (2011). Metodika optimizacii nadezhnosti sistem s setevoj strukturoj. Trudy SPIIRAN, 1 (16), 231–242. Available at: http://www.szma.com/ skvortsov_1.pdf

15. Gordeyev, V., Basenko, V., Vozgrina, G., Minkovich, E. (1992). Method and Programmer for Calculation of Large-Span Spatial Symmetrical Structures Using Personal Computer. Innovative Large Steel Structures. Concept, Design, Construction. Montreal, Canada, 627 – 639.

16. Colbourn, C. J. (1987). The combinatorics of network reliability. N. Y.: Oxford Univ. Press, 160.

17. Sekerin, A. B. (2005). Metod ocenki ustojchivosti nejronno-setevyh modelej. Jelektronnyj zhurnal «Issledovano v Rossii», 350–354. Available at: http://masters.donntu.org/2009/kita/ stolyar/library/01.pdf

18. Saveleva, O. S. (2015). Primenenie entropiynogo pokazatelya pri podderzhke prinyatiya resheniy na etape proektirovaniya stroitelnyih konstruktsiy. VIsnik NatsIonalnogo tehnIchnogo unIversitetu «HPI», 11, 63–68.

Дата надходження рукопису 23.12.2015

Савєльєва Оксана Степанівна, доктор технічних наук, доцент, кафедра нафтогазового та хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044
E-mail: okssave@gmail.com