

ВРАХУВАННЯ ПОМИЛОК ПЕРЕМИКАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ СИСТЕМИ ІЗ РЕЗЕРВУВАННЯМ ЗА СХЕМОЮ 2-ІЗ-3

Т. О. Стефанович, С. В. Щербовських

Національний університет “Львівська політехніка”

E-mail: tetyana.o.stefanovych@lpnu.ua, shcherbov@gmail.com

Запропоновано модель надійності системи із резервуванням за схемою 2-із-3 та неідеальними перемикальними пристроями, яка призначена для визначення ймовірності її безвідмовної роботи. Особливість моделі полягає у тому, що у ній враховано помилки першого та другого роду для перемикальних пристроїв. Для визначення ймовірнісних характеристик системи використано багатотермінальне динамічне дерево відмов та марковську модель.

Ключові слова: *модель надійності, динамічне дерево відмов, марковська модель, резервування за схемою 2-із-3, перемикальний пристрій.*

ACCOUNT OF THE ERRORS OF SWITCHING DEVICE FOR A SYSTEM WITH 2-OUT-OF-3 REDUNDANCY

T. O. Stefanovych, S. V. Shcherbovskykh

Lviv Polytechnic National University

The mathematical reliability model is developed that takes into account the errors of the first and second type of switching device for a system with 2-out-of-3 redundancy. The proposed model is designed to determine the reliability characteristic. The system consists of three identical energy sources and two switching devices. It is assumed that the system is the non-renewable and the switching devices cannot return to their original state. A fault tree mathematically describes the reliability of the system in which the logical conditions for the mutual influence of the components of the system and switching devices are specified. At the first stage, the fault tree is constructed for the system with ideal switching devices, e. g. they operate instantly and do not allow errors. At the second stage, the features of creating a dynamic k -terminal fault tree are considered taking into account the errors of the first and second kind. It is shown that to describe the system it is necessary to take into account six dynamic phenomena. Based on the fault trees, Markov models for the systems are constructed. Using this model, it is analyzed how the errors of the first and second type of switching devices influence the reliability characteristic of the system.

Keywords: *reliability model, dynamical fault tree, Markov model, 2-out-of-3 redundancy, switching device.*

Одним із способів підвищення надійності технічних систем є застосування структурного резервування. Суть такого резервування полягає у тому, що в структуру системи вводять надлишкові елементи, які за відмови основних елементів системи після відповідного перемикання виконують їх функції. Досить часто використовують резервування за схемою k -із- n . За цією схемою систему розбивають на n однакових підсистем, не менше k із яких повинні бути роботоздатними, щоб уся система функціонувала. Нижче розглянуто найпростіший різновид – резервуванням за схемою 2-із-3 [1]. Для такого типу резервування надлишкові елементи, незалежно від стану інших елементів системи та стану перемикального пристрою, весь час перебувають у навантаженому режимі. Перемикальний пристрій підключає резервні елементи, якщо основні втратили роботоздатність. Під час аналізу надійності таких систем одним із важливих чинників є врахування впливу перемикальних пристроїв на показники надійності системи, який проявляється у появі помилок першого і другого роду. Під помилкою першого роду розуміємо хибне спрацювання перемикального пристрою. Це означає, що основний елемент роботоздатний, але перемикальний пристрій вирішив, що

© Т. О. Стефанович, С. В. Щербовських, 2017

нероботоздатний, і підключив резервний. Під помилкою другого роду розуміємо пропуск моменту спрацювання перемикальним пристроєм. Це означає, що основний елемент відмовив, але перемикальний пристрій вирішив, що цей елемент роботоздатний, і не підключив резервний. Обидві помилки знижують надійність системи та недовикористовують її ресурс.

Нижче формалізовано та проаналізовано вплив помилок першого та другого роду перемикального пристрою на надійність систем із резервуванням за схемою 2-із-3, що актуально під час проектування та експлуатації механічних та електротехнічних систем.

Аналіз останніх досліджень. Для розв'язання поставленого завдання у літературі запропоновано два основних підходи. Перший підхід, який подано у працях [2, 3], ґрунтується на застосуванні логіко-ймовірнісного методу. Згідно з ним, в структуру системи, а саме послідовно резервним елементам, вводять умовний елемент, який відповідає перемикальному пристрою. До різновиду цього підходу також належить метод, який ґрунтується на спрощених емпіричних формулах [4]. Недолік підходу полягає у тому, що помилку першого роду у такий спосіб не можна врахувати, а помилка другого роду врахована у першому наближенні. Зокрема, не враховано, що після переключення перемикального пристрою з основних елементів на резервні нероботоздатність перемикального пристрою не впливає на систему.

Другий підхід базується на побудові графа станів та переходів системи і подальшому його аналізі на основі марковської моделі або методом Монте-Карло. У межах цього підходу виділяємо кілька способів його застосування. Для простих систем таку побудову можна здійснити вручну [5]. Також такий граф можна побудувати на основі технології моделювання систем із елементами, які перебувають у багатьох станах [6–11]. Ця праця є продовженням започаткованого дослідження [12–14], яке ґрунтується на застосуванні багатотермінального динамічного дерева відмов та марковського аналізу.

Розв'язано такі завдання:

- математично описано надійність системи із резервуванням за схемою 2-із-3 та перемикальними пристроями на основі багатотермінального динамічного дерева відмов;
- побудовано граф станів і переходів досліджуваної системи;
- проаналізовано вплив помилок першого і другого роду перемикальних пристроїв на характеристики надійності системи.

Опис системи. До складу досліджуваної системи входять однакові джерела енергії G1, G2 та G3 і перемикальні пристрої S1 і S2. Пристрій S1 перемикає між джерелами G1 та G3, а пристрій S2 – між джерелами G2 та G3 (рис. 1). Система призначена для живлення споживача енергією, який підключений до спільної точки, що з'єднує виходи перемикальних пристроїв S1 та S2. Система роботоздатна, якщо хоча б два роботоздатних джерела з'єднано із споживачем. Розглянемо принцип функціонування системи за умови, що вона невідновлювана і перемикальні пристрої не можуть повернутись у початковий стан. Вважаємо, що у початковому стані усі джерела роботоздатні та навантажені. Перемикальний пристрій S1 підключає споживача до джерела G1, а пристрій

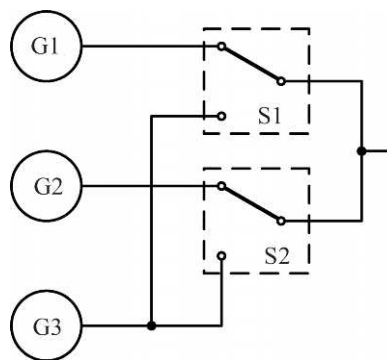


Рис. 1. Структурна схема системи.

S2 – до джерела G2. Джерело G3 у цей час перебуває в гарячому резерві. За відмови джерела G1 пристрій S1 перемикається та підключає споживача до джерела G3. За відмови джерела G2 пристрій S2 перемикається та підключає споживача до джерела G3. Після відмови обох джерел G1 та G2, незалежно від стану джерела G3, система стає нероботоздатною.

Якщо пристрій S1 допускає помилку першого роду, то він замість роботоздатного джерела G1 підключає джерело G3. Якщо пристрій S1 допускає помилку другого роду, то він не підключає джерело G3 замість нероботоздатного джерела G1. Якщо пристрій S2 допускає помилку першого роду, то він замість роботоздатного джерела G2, незалежно від стану пристрою S1, підключає джерело G3. Якщо пристрій S2 допускає помилку другого роду, то він не підключає джерело G3 замість нероботоздатного джерела G2.

Дерево відмов системи. На першому етапі побудуємо дерево відмов системи, виходячи із припущення, що перемикальні пристрої є ідеальними, тобто спрацьовують миттєво і не допускають помилок. На другому етапі розглянемо особливості побудови дерева відмов із урахуванням цих помилок.

Нероботоздатність системи з ідеальними перемикальними пристроями позначимо блоком “Вершина подій 1” (рис. 2). Вона виникає, якщо живлення до споживача не можна подати ні основним способом, ні двома резервними, що описано блоком “Оператор 1”, тип якого задано логічною операцією І. Основним способом не можна живити споживача, якщо відсутнє живлення хоча б від одного із джерел G1 або G2, що описано блоком “Оператор 2”, тип якого задано логічною операцією АБО. Першим резервним способом не можна живити споживача, якщо відсутнє живлення від джерела G2 або G3, що описано блоком “Оператор 3”, тип якого задано логічною операцією АБО, а другим резервним способом – якщо відсутнє живлення від джерела G1 або G3, що описано блоком “Оператор 4”, тип якого задано логічною операцією АБО. Живлення відсутнє внаслідок відмови джерела. Вважаємо, що напрацювання до відмови джерел G1, G2 та G3 розподілено експоненціально із параметрами λ_1 , λ_2 , та λ_3 .

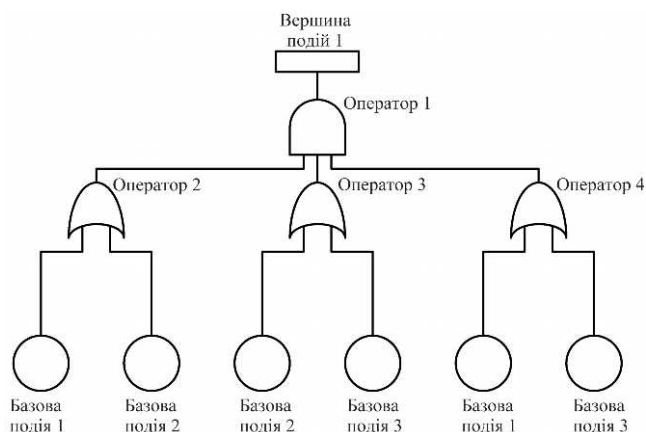


Рис. 2. Дерево відмов системи із ідеальними перемикальними пристроями.

Для опису нероботоздатності системи із врахуванням помилок першого та другого роду перемикальних пристроїв у моделі слід урахувати два явища, а саме, самовільне перемикання контактів і напрацювання до відмови системи керування перемикальними пристроями. Для врахування напрацювання системи керування перемикальними пристроями у дерево відмов додано блоки “Вершина подій 2” та “Вершина подій 3” (рис. 3), тобто дерево відмов є багатотермінальним [12]. Блок “Вершина подій 2” позначає нероботоздатність системи керування

пристроєм S1, а блок “Вершина подій 3” – пристроєм S2. Оскільки система керування перемикальним пристроєм, з точки зору надійності, є одноелементною, то блоки “Вершина подій 2” та “Вершина подій 3” за змістом відповідають блокам “Базова подія 5” та “Базова подія 7”. Напрацювання до відмови систем керування пристроями S1 та S2 розподілено за експоненціальним законом із параметрами λ_5 та λ_7 .

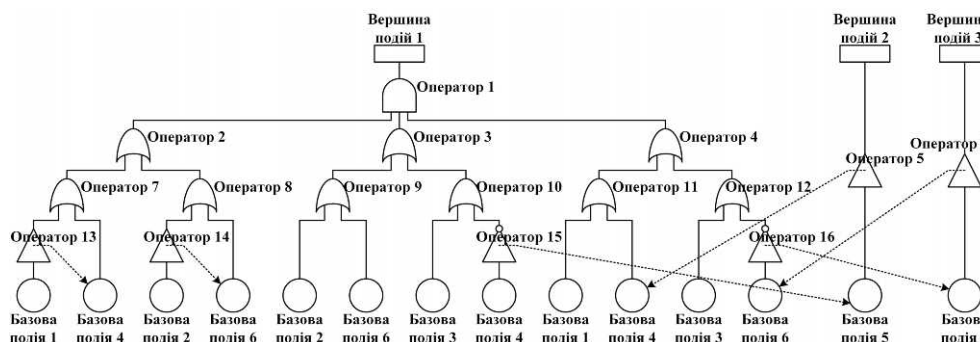


Рис. 3. Дерево відмов системи із врахуванням помилок першого та другого роду перемикальних пристроїв.

Для врахування самовільного перемикання контактів пристроїв у дерево відмов додано блоки “Базова подія 4” та “Базова подія 6”. Блок “Базова подія 4” вказує на стан контактів пристрою S1, зокрема, підключення джерела G1 вважаємо положенням ХИБНО, а підключення джерела G3 – ІСТИННО. Блок “Базова подія 6” вказує на стан контактів пристрою S2, зокрема, підключення джерела G2 вважаємо положенням ХИБНО, а підключення джерела G3 – ІСТИННО. Ймовірність самовільного перемикання контактів пристроїв S1 та S2 розподілено за експоненціальним законом із параметрами λ_4 та λ_6 . Живлення від джерела G1 відсутнє, якщо це джерело відмовило або контакт перемикального пристрою S1 знаходиться у положенні ІСТИННО. Це описано блоками “Оператор 7” та “Оператор 11”, тип яких задано логічною операцією АБО. Своєю чергою, живлення від джерела G2 відсутнє, якщо це джерело відмовило або контакт перемикального пристрою S2 знаходиться у положенні ІСТИННО. Це описано блоками “Оператор 8” та “Оператор 9”, тип яких задано логічною операцією АБО. Живлення від джерела G3 відсутнє у двох випадках: коли таке джерело відмовило або контакт перемикального пристрою S1 знаходиться у положенні ХИБНО, що описано блоком “Оператор 10”, тип якого задано логічною операцією АБО; коли таке джерело відмовило або контакт перемикального пристрою S2 знаходиться у положенні ХИБНО, що описано блоком “Оператор 12”, тип якого задано логічною операцією АБО. Для інверсії сигналів від блоків “Базова подія 4” та “Базова подія 6” застосовано блоки “Оператор 15” і “Оператор 16”, тип яких задано логічною операцією НІ.

У системі відбувається шість динамічних явищ, які полягають у зміні інтенсивностей напрацювання елементів та перемикання контактів залежно від стану інших елементів.

Перше динамічне явище полягає у зміні інтенсивності перемикання пристрою S1 залежно від стану джерела G1. Для його опису додаємо в дерево відмов блок “Оператор 13”, в якому задаємо логічні умови. Якщо джерело G1 роботоздатне, то інтенсивність перемикання пристрою S1 дорівнює λ_4 . У цьому випадку самовільне перемикання є помилкою першого роду. Якщо джерело G1 нероботоздатне, то інтенсивність перемикання пристрою S1 збільшуємо у k разів. У цьому випадку перемикання забезпечує вихід системи із нероботоздатного стану.

Друге динамічне явище полягає у зміні інтенсивності перемикання пристрою S2 залежно від стану джерела G2. У дереві відмов воно описано аналогічно до першого динамічного явища із додаванням блока “Оператор 14”.

Третє динамічне явище полягає у зміні інтенсивності напрацювання системи керування пристроєм S1 залежно від стану його контактів. Для його опису в блоці “Оператор 15” задаємо логічні умови. Якщо контакти пристрою S1 перебувають у положенні ХИБНО, то інтенсивність напрацювання системи керування цим пристроєм дорівнює λ_4 . Якщо контакти перебувають у положенні ІСТИННО, то інтенсивність напрацювання встановлюємо рівною нулю. Введення цього явища у модель спрощує подальші розрахунки.

Четверте динамічне явище полягає у зміні інтенсивності перемикання пристрою S1 залежно від стану його системи керування. Для його опису додаємо в дерево відмов блок “Оператор 5”, в якому задаємо логічні умови. Якщо система керування пристроєм S1 роботоздатна, то інтенсивність перемикання його контактів дорівнює λ_4 . Якщо система керування нероботоздатна, то інтенсивність перемикання встановлюємо рівною нулю. Це означає, що після відмови джерела G1 контакти не зможуть перемкнутись, що спричинить помилку другого роду.

П’яте динамічне явище полягає у зміні інтенсивності напрацювання системи керування пристроєм S2 залежно від стану його контактів. У дереві відмов воно описано аналогічно до третього із застосуванням блока “Оператор 16”.

Шосте динамічне явище полягає у зміні інтенсивності перемикання пристрою S2 залежно від стану його системи керування. У дереві відмов воно описано аналогічно до четвертого із додаванням блока “Оператор 6”.

Граф станів та переходів системи. На підставі поданих вище дерев відмов побудовано графи станів та переходів для системи із ідеальними перемикальними пристроями (рис. 4а) та для системи із врахуванням помилок першого та другого роду перемикальних пристроїв (рис. 4б).

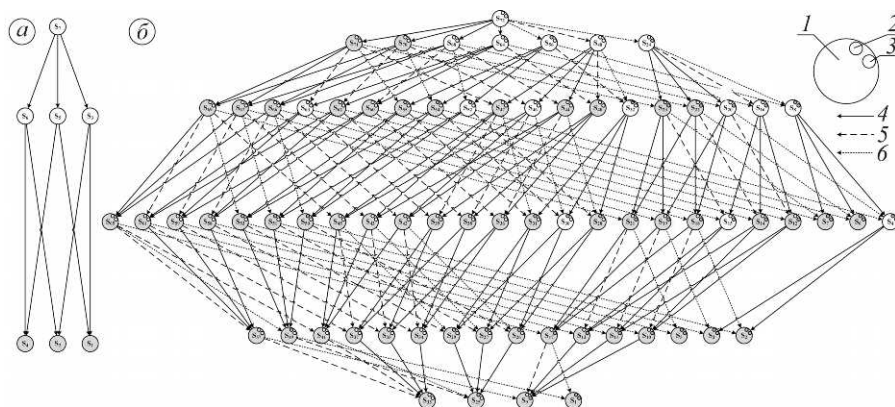


Рис. 4. Граф станів та переходів систем із ідеальними перемикальними пристроями (а); із врахуванням помилок першого та другого роду перемикальних пристроїв (б): 1 – стан системи за наявності живлення споживача; 2 – стан системи керування перемикальним пристроєм S1; 3 – стан системи керування пристроєм S2; 4 – відмова джерел G1, G2 та G3; 5 – перемикання контакту пристроїв S1 і S2; 6 – відмова системи керування пристроями S1 і S2.

На рис. 4 роботоздатні стани зафарбовані білим кольором, а нероботоздатні – сірим. Граф для першої системи (рис. 4а) містить 7 станів, із яких 3 поглинальні, і 9 переходів. Граф для другої системи (рис. 4б) містить 72 стани, із яких 9 поглинальних, і 197 переходів.

Аналіз впливу помилок першого та другого роду на ймовірність безвідмовної роботи системи. Ґрунтуючись на графах станів та переходів системи

побудували однорідні марковські моделі, застосовуючи які, обчислили сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи. Під час аналізу впливу помилок першого та другого роду важливим є не абсолютне значення кожного із параметрів, а співвідношення параметрів джерел із параметрами перемикальних пристроїв, тому доцільно обчислювати у відносних одиницях. За базову величину приймаємо інтенсивність відмов джерела G1 $\lambda_1 = 1$. Оскільки джерела G1, G2 та G3 є однаковими, тому $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$. Приймаємо, що відношення інтенсивності самовільного перемикавання першого пристрою S1 λ_4 до середньої тривалості перемикавання у номінальному режимі роботи становить $k_1 = 10\ 000$. Значення цього відношення обернено пропорційне інерційності спрацювання перемикального пристрою і, в граничному випадку, має прямувати до нескінченності. Оскільки перемикальні пристрої однакові, тому $\lambda_4 = \lambda_6$ та $\lambda_5 = \lambda_7$.

На рис. 5а подано сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи для різних значень параметрів $\lambda_4 = \lambda_6$, які відповідають помилці першого роду, за умови $\lambda_5 = \lambda_7 = 1$. Зокрема, крива 1 відповідає значенню $\lambda_4 = \lambda_6 = 0$; крива 2 – $\lambda_4 = \lambda_6 = 0,1$; крива 3 – $\lambda_4 = \lambda_6 = 0,5$; крива 4 – $\lambda_4 = \lambda_6 = 1$; крива 5 – $\lambda_4 = \lambda_6 = 2$ та крива 6 – $\lambda_4 = \lambda_6 = 10$.

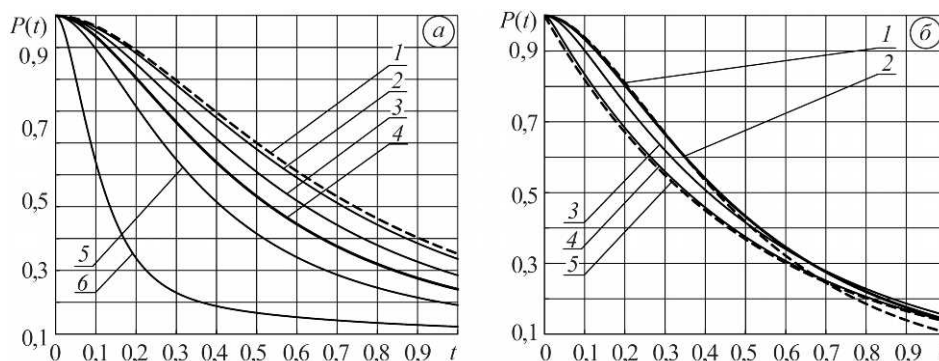


Рис. 5. Сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи, які показують вплив помилки перемикального пристрою першого (а) і другого роду (б).

На рис. 5б подано сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи для різних значень параметрів $\lambda_5 = \lambda_7$, які відповідають помилці другого роду, за умови $\lambda_4 = \lambda_6 = 1$. Зокрема, крива 1 відповідає значенню $\lambda_5 = \lambda_7 = 0$; крива 2 – $\lambda_5 = \lambda_7 = 1$; крива 3 – $\lambda_5 = \lambda_7 = 10$; крива 4 – $\lambda_5 = \lambda_7 = 100$ та крива 5 – $\lambda_5 = \lambda_7 = \infty$.

Для порівняння результатів крива 4 на рис. 5а та крива 2 на рис. 5б є однією і тією ж характеристикою, що відповідає умові $\lambda_4 = \lambda_6 = 1$ та $\lambda_5 = \lambda_7 = 1$. Параметри $\lambda_4 = \lambda_6$ та $\lambda_5 = \lambda_7$ можуть набувати значень у діапазоні від 0 до ∞ , де значення 0 відповідає відсутності впливу помилки, а значення ∞ – абсолютному впливу цієї помилки. На рис. 5а криву, яка відповідає умові $\lambda_4 = \lambda_6 = \infty$, не показано, оскільки надійність у цьому випадку прямує до 0. Це пов'язано із тим, що у початковий момент часу обидва перемикальні пристрої спрацьовують, у результаті чого система одразу стає нероботоздатною.

Як видно із рис. 5, за покрокового збільшення параметрів $\lambda_4 = \lambda_6$ та $\lambda_5 = \lambda_7$ імовірність безвідмовної роботи системи знижується. На кривих рис. 5б під час зміни параметрів $\lambda_5 = \lambda_7$ у межах від 0 до 1 спостерігаємо, що збільшення впливу помилки другого роду спричиняє зростання надійності системи. У результаті відзначаємо явище, за якого для часу $t = 1$ надійність системи, в якій помилка другого роду відсутня, є нижчою за надійність системи, в якій відсутнє резервування. Це потребує подальшого дослідження.

ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель надійності, яка враховує помилки першого та другого роду перемикального пристрою для системи із резервуванням за схемою 2-із-3 та призначена для визначення ймовірності безвідмовної роботи. Надійність системи математично описано багатотермінальним динамічним деревом відмов, в якому задано логічні умови взаємного впливу елементів системи та перемикальних пристроїв. Ймовірнісні характеристики системи визначено за марковською моделлю, яка сформована на основі дерева відмов. За допомогою цієї моделі проаналізовано вплив помилок першого та другого роду перемикальних пристроїв на ймовірнісні характеристики досліджуваної системи. Кількісно показано, що зі збільшенням інтенсивностей самовільного перемикання контактів та відмов системи керування пристроєм ймовірність безвідмовної роботи системи зменшується.

Подальші дослідження скеровані на розроблення моделі надійності системи із ковзним резервуванням, яка враховуватиме вплив помилок першого та другого роду перемикального пристрою.

1. Стефанович Т. О., Щербовських С. В. Модель надійності для аналізу причин нероботоздатності системи із несиметричним навантажувальним резервуванням за схемою 2-із-3 // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2016. – № 22 (98). – С. 347–353.
2. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных систем. – М.: “ЭНЕРГИЯ”, 1977. – 536 с.
3. Mostafa Abouei Ardakan, Ali Zeinal Hamadani. Reliability optimization of series-parallel systems with mixed redundancy strategy in subsystems // Reliability Engineering & System Safety. – 2014. – **130**. – P. 132–139.
4. Ушаков И. А. Курс теории надежности систем: учебное пособие. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с.
5. Надежность дублированных вычислительных комплексов / В. А. Богатырев, С. А. Башкова, В. Ф. Беззубов, А. В. Полякова, Е. Ю. Котельникова, И. Ю. Голубев // Науч.-техн. вестник Санкт-Петербургск. гос. ун-та информац технологий, механики и оптики. – 2011. – № 6 (76). – С. 76–80.
6. Волочий Б. Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2004. – 219 с.
7. Лозинський О. Ю., Щербовських С. В. Визначення ефективної підмножини фазових законів розподілу для утворення математичних моделей надійності ремонтованих об'єктів // Відбір і обробка інформації. – 2004. – № 21. – С. 17–22.
8. Daniya Zamalieva, Alper Yilmaz, Tunc Aldemir. A probabilistic model for online scenario labeling in dynamic event tree generation // Reliability Engineering & System Safety. – 2013. – **120**. – P. 18–26.
9. Daniya Zamalieva, Alper Yilmaz, Tunc Aldemir. Online scenario labeling using a hidden Markov model for assessment of nuclear plant state // Reliability Engineering & System Safety. – 2013. – **110**. – P. 1–13.
10. Conception of Repairable Dynamic Fault Trees and resolution by the use of RAATSS, a Matlab® toolbox based on the ATS formalism / G. Manno, F. Chiacchio, L. Compagno, D. D'Urso, N. Trapani // Reliability Engineering & System Safety. – 2014. – **121**. – P. 250–262.
11. Daniele Codetta-Raiteri. Integrating several formalisms in order to increase Fault Trees' modeling power // Reliability Engineering & System Safety. – 2011. – **96**, № 5. – P. 534–544.
12. Щербовських С. В. Математичні моделі та методи для визначення характеристик надійності багатотермінальних систем із урахуванням перерозподілу навантаження. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2012. – 296 с.
13. Москвіна І. І., Стефанович Т. О., Щербовських С. В. Врахування помилок першого та другого роду перемикального пристрою для системи із холодним резервуванням // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2016. – № 6 (80). – С. 113–119.
14. Стефанович Т. О., Щербовських С. В. Врахування помилок першого та другого роду перемикального пристрою для системи із двократним гарячим резервуванням // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. Серія “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні”. – 2017. – № 867. – С. 29–35.

Одержано 22.05.2017