

**АНАЛІЗ ПРИЧИНИ НЕПРАЦЕЗДАТНОСТІ СИСТЕМИ
ІЗ МІСТКОВОЮ СТРУКТУРОЮ З УРАХУВАННЯМ ЗМІНИ
НАВАНТАЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕМЕНТА**

Т. О. Стефанович, Р. І. Желяк, С. В. Щербовських

Національний університет “Львівська політехніка”

E-mail: stefanovych@lp.edu.ua, shcherbov@lp.edu.ua

Проаналізовано вплив на причини непрацездатності умов введення внутрішнього елемента системи із містковою структурою із холодного резерву. Зокрема, розглянуто умови такого введення за мінімального та максимального використання елемента, а також його застосування у гарячому резерві. Побудовано динамічні дерева відмов та сформовано марковські моделі надійності.

Ключові слова: *модель надійності, причина непрацездатності, місткова структура, перерозподіл навантаження, динамічне дерево відмов, марковська модель.*

**FAILURE CAUSES ANALYSIS OF A BRIDGE STRUCTURE SYSTEM
WITH ACCOUNT OF INTERNAL COMPONENT LOAD-SHARING**

T. O. Stefanovych, R. I. Zhelyak, S. V. Shcherbovskykh

Lviv Polytechnic National University

The impact on failure causes of cold redundancy introduction conditions for internal component of the system with bridge structure is analyzed. System reliability is formalized based on dynamic fault tree. In the paper three reliability models of the system with a bridge structure are proposed and compared. In the first model a basic system with bridge structure is considered. This model corresponds to the internal component hot redundancy case. In the second model the features for cold redundancy case with the use of internal component minimum are considered. In the third model the features for cold redundancy case with internal component maximum use are considered too. Special relation condition gate with zero-threshold is introduced to dynamic fault tree. This gate avoids load-sharing conditions impact on the above event. For each dynamic fault tree the Markov model is formed and failure cause probability characteristics are calculated.

Keywords: *reliability model, failure cause, bridge structure, load-sharing, dynamical fault tree, Markov model.*

Аналіз проблеми. Рекомендації для підвищення надійності технічних систем розробляють на основі пошуку та аналізу причин їх непрацездатності. Тут маємо на увазі унікальний набір елементів, одночасна непрацездатність яких зумовлює непрацездатність усієї системи. Завдання аналізу надійності – знайти усі незалежні причини непрацездатності системи та їх ймовірнісні характеристики. Розглянемо проблеми, які виникають під час визначення причин непрацездатності системи із містковою структурою, в якій внутрішній елемент перебуває у холодному резерві. Така система є проміжним різновидом між системами із роздільним та загальним резервуванням. Іншими словами, її слід розглядати як систему із роздільним резервуванням, де внутрішній елемент, що з'єднує виходи елементів першої групи та входи другої, не є абсолютно надійним і працює як фрагмент заміщувального резервування. Залежно від особливостей функціонування системи можна вказати кілька умов, за яких внутрішній елемент слід вводити із холодного резерву у навантажений стан. Внаслідок зміни навантаження міняються параметри його надійності, що впливає на ймовірнісні характеристики причин непрацездатності усієї системи. Отже, необхідно розробити моделі надійності, які забезпечать адекватне врахування зміни навантаження внутрішнього еле-

мента системи із містковою структурою під час аналізу цих причин. Ця проблема виникає під час проектування та оцінки надійності радіотехнічних, електротехнічних та механічних систем, які застосовують в об'єктах підвищеної небезпеки.

Аналіз останніх досліджень. Для визначення ймовірнісних характеристик причин непрацездатності систем виділяємо два підходи [1]. Перший ґрунтується на складанні дерева відмов системи, яке аналізують логіко-ймовірнісним методом [2, 3]. Тут на основі дерева відмов складають логічні умови, які відповідають причинам непрацездатності системи, а потім їх перетворюють у ймовірнісні вирази. Він простий у застосуванні, проте не вдається коректно враховувати процеси, пов'язані зі зміною навантаження елементів. Другий заснований на побудові динамічного дерева відмов системи, для аналізу якого застосовують кілька різних методів. Зокрема, в праці [4] динамічне дерево відмов перетворюють у мережу Петрі, яку кількісно аналізують методом Монте-Карло. Недоліком цього методу є спотворення результатів моделювання стохастичними флуктуаціями, а також тривалість обчислень. У працях [5–7] динамічне дерево відмов перетворюють в однорідну марковську модель. Недолік такого способу – висока розмірність марковської моделі, а також її обмеження експоненціальним розподілом. Для послаблення такого обмеження необхідно розщепити простір станів [8–11], що забезпечить адекватне врахування запам'ятовування передісторії напруження елементів системи за навантаженням.

Нижче сформовано динамічне дерево відмов для системи із містковою структурою; фрагмент динамічного дерева відмов, який відповідає умові максимального використання внутрішнього елемента; фрагмент динамічного дерева відмов, що відповідає умові мінімального використання внутрішнього елемента; за динамічними деревами відмов системи побудовано марковські моделі та обчислено ймовірнісні характеристики причин непрацездатності.

Опис системи. Система із містковою структурою складається із п'яти елементів (рис. 1): двох блоків SRC1 і SRC2, які генерують сигнал (далі за текстом – генераторів); двох блоків RSV1 і RSV2, які одержують сигнал (далі за текстом – одержувачів), та силового перемикача SWT.

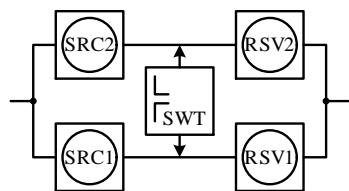


Рис. 1. Структурна схема системи.

Генератор SRC1 та одержувач RSV1 утворюють першу підсистему, а генератор SRC2 і одержувач RSV2 – другу. Підсистеми дублюють одна одну. Вважаємо, що перерозподілом навантаження між елементами цих підсистем можна знехтувати. Тобто, якщо такий елемент працездатний, то для будь-якої працездатної конфігурації системи він працює у номінальному режимі. Між генератором SRC1 та одержувачем RSV1 першої підсистеми і генератором SRC2 та одержувачем RSV2 другої включено силовий перемикач SWT, який є внутрішнім елементом. Розглянемо дві умови введення внутрішнього елемента із холодного резерву: максимального та мінімального його використання. Перша полягає у тому, що внутрішній елемент вмикають у структуру системи, якщо відбулась відмова хоча б одного із елементів основної або резервної підсистем, проте у кожній підсистемі є хоча б один працездатний елемент, і загалом уся система працездатна. Друга умова полягає у тому, що внутрішній елемент вмикають у структуру системи, якщо елементів основної та резервної підсистем недостатньо для виконання функції системи. Якщо утворена після введення внутрішнього елемента структура забезпечує працездатність, то такий елемент переходить у навантажений режим, в іншому випадку система стає непрацездатною. Вважаємо, що засоби технічної діагностики та перемикач ідеальні, а навантаження внутрішнього елемента змінюється миттєво

порівняно із тривалістю стаціонарного його функціонування.

Формалізуємо надійність системи, використовуючи динамічні дерева відмов, тобто математичну модель, яка описує умову непрацездатності системи та умови зміни навантаження між її елементами на основі блоків, що позначають логічні операції та операції відношення. Сформуємо спочатку динамічне дерево відмов для системи з містковою структурою без жодних умов, а тоді розглянемо лише особливості побудови динамічних дерев відмов системи для різних умов введення внутрішнього елемента.

Побудова динамічного дерева відмов системи. Дерево відмов системи без урахування умов введення внутрішнього елемента подано на рис. 2. Воно математично описує лише умову непрацездатності системи із містковою структурою.

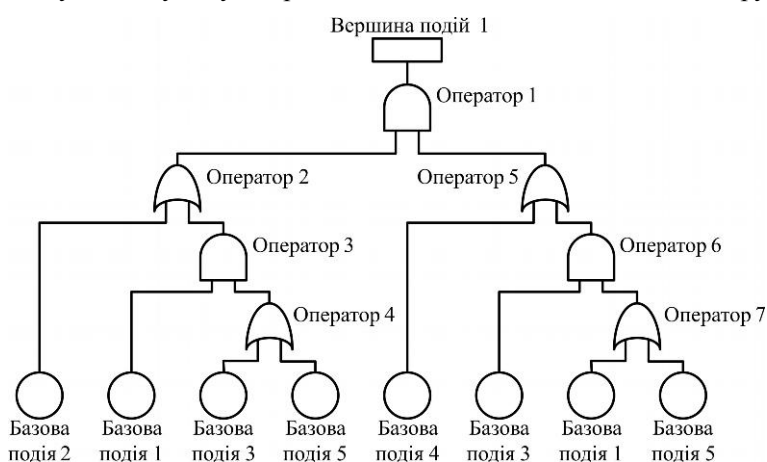


Рис. 2. Динамічне дерево відмов системи із містковою структурою.

Непрацездатність системи, яку позначено блоком “вершина подій 1”, критична, тобто після її появи відновлення системи не розглядають. Така подія настає, якщо обидві підсистеми не здатні виконувати свої функції, що описує блок “оператор 1”, тип якого задано логічною операцією І. Перша підсистема не може виконувати свою функцію, якщо одержувач RSV1 непрацездатний або втрачає живлення, що описує блок “оператор 2”, тип якого задано логічною операцією АБО. Одержувач RSV1 втрачає живлення, якщо генератор SRC1 непрацездатний та неможливо подати живлення від генератора SRC2, що описує блок “оператор 3”, тип якого задано логічною операцією І. Неможливість подати живлення від генератора SRC2 настає, якщо стають непрацездатними генератор SRC2 або силовий перемикач SWT, що описує блок “оператор 4”, тип якого задано логічною операцією АБО. Другу підсистему аналізуємо так само. Вона не здатна виконувати свою функцію, якщо одержувач RSV2 стає непрацездатним або втрачає живлення, що описує блок “оператор 5”, тип якого задано логічною операцією АБО. Одержувач RSV2 втрачає живлення, якщо генератор SRC2 стає непрацездатним та неможливо подати живлення від генератора SRC1, що описує блок “оператор 6”, тип якого задано логічною операцією І. Подати живлення від генератора SRC1 неможливо, якщо стають непрацездатними генератор SRC1 або силовий перемикач SWT, що описує блок “оператор 7”, тип якого задано логічною операцією АБО. Непрацездатність генератора SRC1 позначено блоком “базова подія 1”, а його напрацювання до відмови розподілено за законом Вейбулла із параметрами α_1 та β_1 . Непрацездатність одержувача RSV1 – блоком “базова подія 2” та за розподілом Вейбулла із параметрами α_2 та β_2 ; непрацездатність генератора SRC2 – блоком “базова подія 3” та за розподілом Вейбулла із параметрами α_3 та β_3 ; не-

працездатність RSV2 – блоком “базова подія 4” та за розподілом Вейбулла із параметрами α_4 та β_4 ; непрацездатність перемикача SWT – блоком “базова подія 5” та за розподілом Вейбулла із параметрами α_5 та β_5 . Тривалість ремонтування елементів системи вважаємо розподіленою експоненціально із параметром μ . Зауважимо, що без означення умов зміни навантаження ця модель відповідає експлуатації внутрішнього елемента у режимі гарячого резерву. Це свідчить, що незалежно від функціональної потреби у такому елементі його навантаження для будь-якої працездатної конфігурації номінальне.

Умови максимального та мінімального використання внутрішнього елемента. Особливість динамічного дерева відмов системи для умови максимального використання внутрішнього елемента полягає ось у чому (рис. 3а).

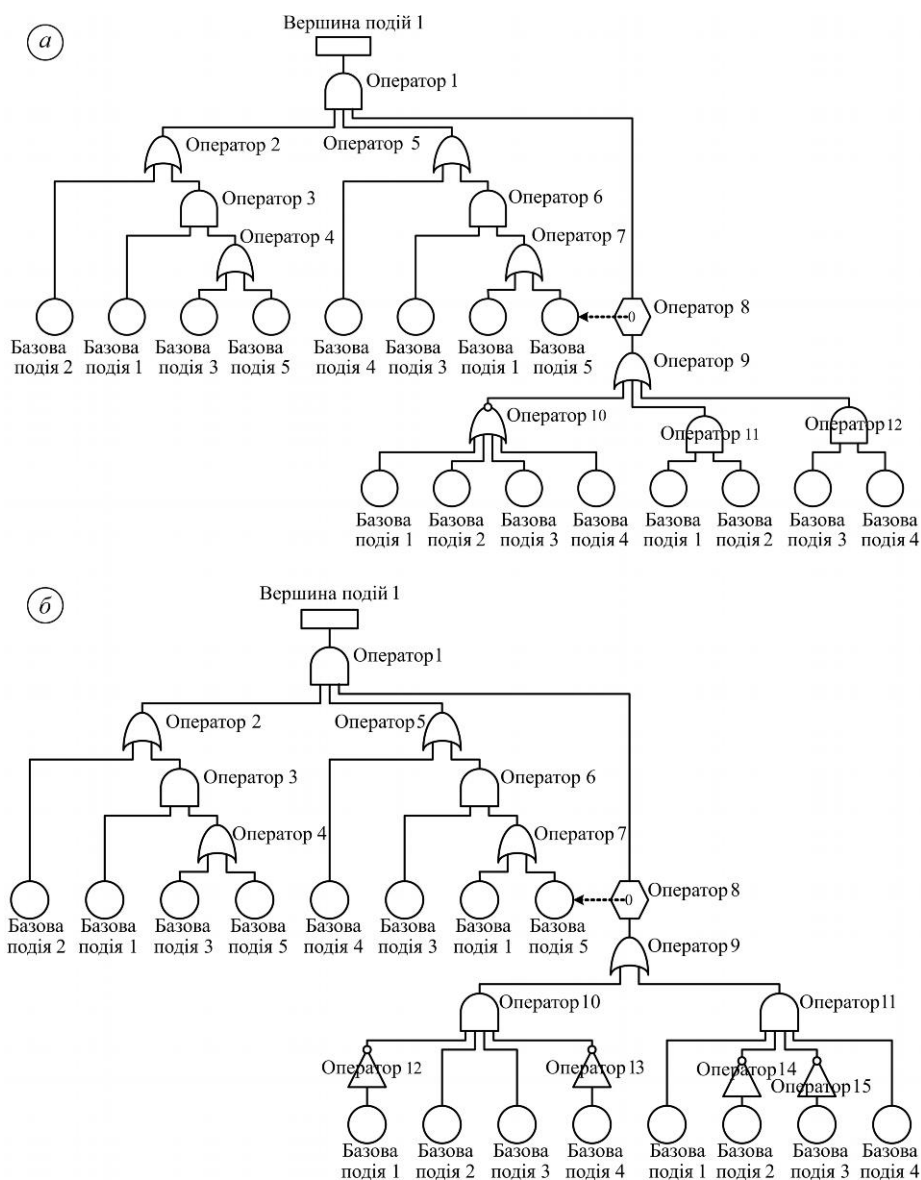


Рис. 3. Динамічне дерево відмов системи із містковою структурою, в якій внутрішній елемент вводять із холодного резерву за умов максимального (а) та мінімального (б) використання.

До динамічного дерева відмов (рис. 2), яке математично описує умову непрацездатності системи, добудовуємо фрагмент, який математично описує умову зміни навантаження внутрішнього елемента. Щоб остання не впливала на умову непрацездатності, у фрагмент додаємо блок “оператор 8”, тип якого задаємо операцією відношення із порогом 0. Навантаження змінюється, якщо у системі відбувається хоча б одна із трьох контрольних подій, що описує блок “оператор 9”, тип якого задано логічною операцією АБО. У цьому ж блоці задано умову зміни навантаження. Якщо логічний сигнал на виході блока ІСТИННО, тобто умова справджується, то інтенсивність напруження силового перемикача SWT, яку задано у блоці “базова подія 5”, встановлюємо рівною нулю. Перша контрольна подія полягає у тому, що жодний із елементів, а зокрема генератор SRC1, одержувач RSV1, генератор SRC2 та одержувач RSV2, не відмовив, що описує блок “оператор 10”, тип якого задано логічною операцією АБО–НІ. Друга контрольна подія – відмова генератора SRC1 та одержувача RSV1, тобто обох елементів першої підсистеми, що описує блок “оператор 11”, тип якого задано логічною операцією І. Третя контрольна подія – відмова генератора SRC2 та одержувача RSV2, тобто обох елементів другої підсистеми, що описує блок “оператор 12”, тип якого задано логічною операцією І.

Особливість динамічного дерева відмов системи для умови мінімального використання внутрішнього елемента полягає ось у чому (рис. 3б).

Як і для динамічного дерева відмов (див. рис. 2), що математично описує умову непрацездатності системи, добудовуємо фрагмент, який математично описує умову зміни навантаження внутрішнього елемента. Щоб остання не впливала на умову непрацездатності, у фрагмент додаємо блок “оператор 8”, тип якого задаємо операцією відношення із порогом 0. Навантаження змінюється, якщо система переходить в один із двох контрольних станів, що описує блок “оператор 9”, тип якого задано логічною операцією АБО. У цьому ж блоці задано умову зміни навантаження. Якщо на вхід блока подають логічний сигнал ХИБНО, тобто жодна умова не справджується, то інтенсивність напруження силового перемикача SWT, який задано у блоці “базова подія 5”, встановлюємо рівною нулю. Для першого контрольного стану генератор SRC1 та одержувач RSV2 непрацездатні, а одержувач RSV1 та генератор SRC2 працездатні. Для другого, навпаки, генератор SRC1 та одержувач RSV2 працездатні, а одержувач RSV1 та генератор SRC2 непрацездатні. Переходи системи у контрольні стани діагностують за станами елементів обох підсистем, що описують блоки “оператор 10” та “оператор 11”, тип яких задано логічною операцією І. Інверсію станів елементів підсистем виконують блоки “оператор 12”–“оператор 15”, тип яких задано операцією НІ.

Ймовірнісні характеристики системи. За поданими вище динамічними деревами відмов системи із містковою структурою згідно із формалізованими правилами [10] складено графи станів та переходів та відповідні їм розщеплені однорідні марковські моделі, характеристики розмірності яких подано у таблиці. Розмірність графа оцінюємо за кількістю його станів та переходів, які наведені через кошу ризику, а марковської моделі – за кількістю фаз.

Характеристика розмірності моделей надійності системи із містковою структурою

Умови функціонування внутрішнього елемента системи, тип резервування		Розмірність моделі надійності	
		граф станів та переходів	розщеплена марковська модель
Гаряче резервування		30 / 80	960
Холодне резервування	Максимальне використання	30 / 77	960
	Мінімальне використання	17 / 38	544

Система із містковою структурою для усіх режимів функціонування внутрішнього елемента має лише чотири причини непрацездатності: 1 – генераторів SRC1 та SRC2; 2 – одержувачів RSV1 та RSV2; 3 – генератора SRC2, силового перемикача SWT та одержувача RSV1; 4 – генератора SRC1, силового перемикача SWT та одержувача RSV2. Вважаємо, що параметри елементів системи набувають таких числових значень: $\alpha_1 = 10\ 000$ год, $\beta_1 = 1,1$; $\alpha_2 = 5\ 000$ год, $\beta_2 = 1,3$; $\alpha_3 = 9\ 000$ год, $\beta_3 = 1,1$; $\alpha_4 = 4\ 000$ год, $\beta_4 = 1,3$; $\alpha_5 = 100$ год, $\beta_5 = 1,2$ та $\mu = 0,02$ год⁻¹. На основі марковських моделей обчислили ймовірнісні характеристики причин непрацездатності системи із містковою структурою (рис. 4). Зокрема, побудували (рис. 4а) сімейство кривих ймовірності непрацездатності системи внаслідок причин 1 і 2 (рис. 4б), 3 (рис. 4в) та 4 (рис. 4г).

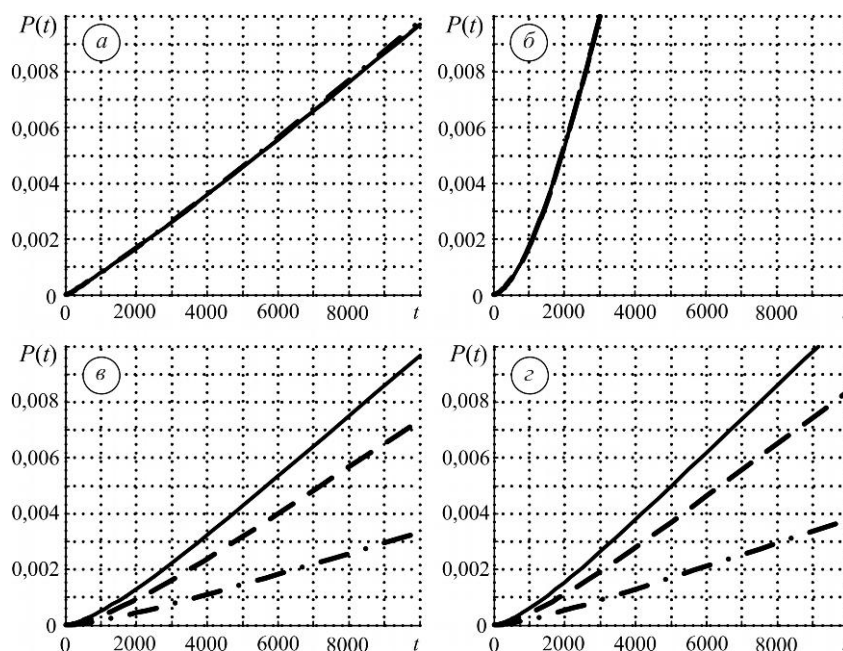


Рис. 4. Криві ймовірнісних характеристик причин непрацездатності системи із містковою структурою.

На усіх чотирьох фрагментах суцільні лінії – ймовірнісні характеристики причин непрацездатності системи, в якій внутрішній елемент перебуває у гарячому резерві; штрихові – у холодному резерві та умови максимального використання; штрих-пунктирні – у холодному резерві та умови мінімального використання.

Режим функціонування внутрішнього елемента суттєво впливає лише на ті ймовірнісні характеристики причин непрацездатності систем, в які він входить безпосередньо (причини 3 та 4) (рис. 4в, г). Впливом на ймовірнісні характеристики причин непрацездатності систем, в які він не входить безпосередньо (причини 1 та 2), можна знехтувати (рис. 4а, б, де криві практично збігаються). Сімейство кривих на рис. 4в, г свідчить, що функціонування внутрішнього елемента у гарячому резерві призводить до суттєвого впливу причин 3 і 4, які кількісно сумірні із причиною 1. Холодне резервування за максимального використання внутрішнього елемента послаблює вплив причин 3 та 4 на 24%, а за мінімального – на 66%.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано вплив на ймовірнісні характеристики причин непрацездатності умови введення із холодного резерву внутрішнього елемента системи із

містковою структурою. Зокрема, розглянуто умови введення за мінімального та максимального його використання, а також використання у гарячому резерві. Побудовано динамічні дерева відмов, в яких математично описано умову настання непрацездатності системи та умови зміни навантаження внутрішнього елемента. Ймовірнісні характеристики причин непрацездатності місткової системи визначено за марковськими моделями. Показано, на які причини непрацездатності системи умови введення внутрішнього елемента із холодного резерву впливають, а на які цим впливом можна знехтувати. Для причин непрацездатності, для яких такий вплив вагомий, одержано кількісну його оцінку.

1. *Dynamic fault trees resolution: A conscious trade-off between analytical and simulative approaches* / F. Chiacchio, L. Compagno, D. D'Urso, G. Manno, N. Trapani // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2011. – **96**, № 11. – P. 1515–1526.
2. *Vega M., Sarmiento H. G. Algorithm to evaluate substation reliability with cut and path sets* // *Industry Applications, IEEE Transactions on*. – 2008. – **44**, № 6. – P. 1851–1858.
3. *Wei-Chang Yeh. A new algorithm for generating minimal cut sets in k-out-of-n networks* // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2006. – **91**, № 1. – P. 36–43.
4. *Khanh Nguyen T. P., Julie Beugina, Juliette Marais. Method for evaluating an extended Fault Tree to analyse the dependability of complex systems: Application to a satellite-based railway system* // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2015. – **133**. – P. 300–313.
5. *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.
6. *Liudong Xinga, Akhilesh Shrestha, Yuanshun Daia. Exact combinatorial reliability analysis of dynamic systems with sequence-dependent failures* // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2011. – **96**, № 10. – P. 1375–1385.
7. *Daniele Codetta-Raiteri. Integrating several formalisms in order to increase Fault Trees' modeling power* // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2011. – **96**, № 5. – P. 534–544.
8. *Shcherbovskykh S., Lozynsky O., Marushchak Ya. Failure intensity determination for system with standby doubling* // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2011. – **87**, № 5. – P. 160–162.
9. *Mandziy B., Lozynsky O., Shcherbovskykh S. Mathematical model for failure cause analysis of electrical systems with load-sharing redundancy of component* // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2013. – **89**, № 11. – P. 244–247.
10. *Щербовських С. В. Математичні моделі та методи для визначення характеристик надійності багатотермінальних систем із урахуванням перерозподілу навантаження*. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 296 с.
11. *Stefanovych T., Shcherbovskykh S., Drozdziel P. The reliability model for failure cause analysis of pressure vessel protective fittings with taking into account load-sharing effect between valves* // *Diagnostyka*. – 2015. – **16**, № 4. – P. 17–24.

Одержано 10.07.2015