

МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПРИЧИН НЕРОБОТОЗДАТНОСТІ ГІДРАВЛІЧНОЇ СТАНЦІЇ ІЗ РЕЗЕРВУВАННЯМ ЗАПОБІЖНОГО КЛАПАНА

Т. О. Стефанович, С. В. Щербовських

Національний університет “Львівська політехніка”

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

Запропоновано математичну модель надійності гідравлічної станції із резервуванням запобіжного клапана, яка адекватно враховує вплив коефіцієнта навантаження для резервного запобіжного клапана на ймовірнісні характеристики причин нероботоздатності цієї системи. Для визначення надійності застосоване динамічне дерево відмов та марковська модель.

Ключові слова: *модель надійності, динамічне дерево відмов, марковська модель, гідравлічна станція, причина нероботоздатності.*

RELIABILITY MODEL DEVELOPING FOR FAILURE CAUSE ANALYSIS OF HYDRAULIC STATION WITH SAFETY VALVE REDUNDANCY

Tetyana Stefanovych, Serhiy Shcherbovskykh

Lviv Polytechnic National University

The mathematical reliability model for hydraulic station with safety valve redundancy is proposed. The model is designed for analysis of a such system failure cause. The reliability is formalized based on a dynamic fault tree. Special repeater gate block is used for load-sharing condition definition. In particular, the gate block provides the account of a load-sharing process for warm redundant safety valve. For failure cause characteristics a calculation dynamic fault tree is transformed to the split homogeneous Markov model. The Markov model based on tensor transformation formulas, take into account the Weibull distribution for component life. Using the simulation results the component priority for the system failure causes can be effectively determined.

Keywords: *reliability model, dynamical fault tree, Markov model, hydraulic stations failure cause.*

Гідравлічна станція – це технічна система, яка перетворює енергію приводного двигуна у механічну енергію рідини та керує потоком цієї рідини. Відмова гідравлічної станції спричиняє нероботоздатність гідравлічного приводу, а отже, технологічного обладнання. Одним із найнебезпечніших явищ у гідравлічній системі є перевищення тиску гідравлічної рідини, що може спричинити механічне руйнування обладнання і трубопроводів. Щоб запобігти цьому, у гідравлічну систему вводять запобіжний клапан, який дублюють резервним із аналогічними характеристиками.

Під час проектування гідравлічної станції важливо забезпечити прийнятний рівень її надійності. Цей етап зводиться не лише до визначення інтегрального показника надійності, але й передбачає аналіз усіх причин її нероботоздатності та розроблення рекомендацій для підвищення надійності. В гідравлічній станції навантаження резервного запобіжного клапана залежить від стану, в якому перебуває основний запобіжний клапан. Зі зміною навантаження резервного запобіжного клапана змінюються характеристики надійності усєї системи.

Нижче проаналізовано причини нероботоздатності гідравлічної станції з урахуванням впливу зміни навантаження її запобіжних клапанів.

© Т. О. Стефанович, С. В. Щербовських, 2015

Огляд останніх досліджень. Для побудови моделей надійності гідравлічних станцій виділяємо такі підходи. У праці [1] застосовані дерева відмов, які базуються на логіко-ймовірнісному методі. Недолік такого підходу в тому, що він не забезпечує адекватне врахування явищ, пов'язаних зі зміною навантаження, а також не розрізняє катастрофічні і некатастрофічні відмови елементів. У статтях [2, 3] використовують моделі надійності, які ґрунтуються на імітаційному моделюванні за методом Монте-Карло. Недоліком цього підходу є те, що одержані результати спотворені флуктуаціями, амплітуда яких для робочого діапазону параметрів співвимірні з значеннями досліджуваних характеристик. У працях [4, 5] використовують марковські моделі надійності, які базуються на аналізі простору станів. Їх недоліком є обмеження експоненціальним розподілом, а також складність побудови.

Для розв'язання поставленого завдання використаємо підхід, який поєднує динамічні дерева відмов та марковські моделі надійності. Для послаблення обмеження експоненціальним розподілом застосуємо розщеплення простору станів [6–8], яке забезпечує врахування довільних розподілів і “запам'ятовування” передісторії напруцювання елементів системи за навантаженням.

Розв'язали такі завдання:

- математично описали надійність гідравлічної станції на основі динамічного дерева відмов;
- побудували модель станів та подій системи і розщеплену однорідну марковську модель системи;
- визначили кількісні характеристики для усіх причин відмови гідравлічної станції та дослідили вплив на них коефіцієнта зменшення навантаження для резервного клапана тиску.

Опис системи та її динамічне дерево відмов. У структурі гідравлічної станції виділяємо чотири основних елементи: електричний двигун 1, насос 2, основний 3 та резервний 4 запобіжні клапани (рис. 1).

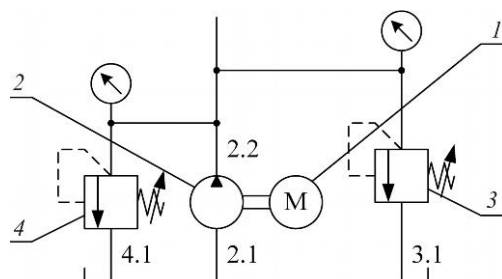


Рис. 1. Структурна схема гідравлічної станції.

Гідравлічна станція функціонує так. Електричний двигун приводить у рух гідравлічний насос, який через трубопровід 2.1 подає із бака у робочу лінію 2.2 гідравлічну рідину. Для уникнення підвищення тиску у лінії вище допустимого значення встановлено два запобіжні клапани 3 та 4. Якщо тиск у лінії перевищує перше встановлене допустиме значення, то спрацьовує основний запобіжний клапан 3, і надлишок гідравлічної рідини повертається назад у бак трубопроводом 3.1. Якщо тиск продовжує зростати і перевищує друге встановлене допустиме значення, то спрацьовує резервний запобіжний клапан 4, і надлишок гідравлічної рідини повертається назад у бак трубопроводом 4.1.

Запобіжні клапани функціонують за алгоритмом полегшеного резервування: якщо основний запобіжний клапан 3 роботоздатний, то гідравлічна рідина рухається трубопроводом 3.1, тому основний клапан перебуває під номінальним на-

вантаженням, а резервний, якщо роботоздатний, – під полегшеним. Якщо основний клапан 3 нероботоздатний, а резервний клапан 4 роботоздатний, то гідравлічна рідина рухається трубопроводом 4.1, тому резервний клапан перебуває під номінальним навантаженням.

Формалізуємо надійність гідравлічної станції динамічним деревом відмов, структура якого подана на рис. 2а. Звернемо увагу, що логічна структурна схема гідравлічної станції утворює послідовно-паралельне сполучення елементів, як показано на рис. 2б. Динамічне дерево відмов є математичною моделлю, яка описує умову нероботоздатності системи та умови зміни навантаження між її елементами на основі блоків, які позначають логічні операції та операції відношення. Нероботоздатність гідравлічної станції позначена блоком “Вершина подій”. Вважаємо, що така подія є катастрофічною, тобто, поки вона не відбулась, ремонтування будь-якого запобіжного клапана можна виконати стільки разів, скільки у цьому виникає потреба. Вважаємо, що відновлений клапан за експлуатаційними характеристиками відповідає новому, а інший – попередньо напрацьованим. Після настання відмови гідравлічної станції подальший її ремонт не розглядаємо. Така подія відбувається, якщо настає хоча б одна із трьох подій, що описує блок “Оператор 1”, тип якого задає логічна операція АБО.

Перша подія настає у разі відмови електричного двигуна 1, що описує блок “Базова подія 1”. Вважаємо, що напрацювання до відмови двигуна розподілено за законом Вейбулла із параметрами α_1 і β_1 . Другу подію спричиняє відмова гідравлічного насоса 2, що описує блок “Базова подія 2”. Вважаємо, що напрацювання до відмови насоса розподілено за законом Вейбулла із параметрами α_2 і β_2 . Третя подія зумовлена настанням нероботоздатності обох запобіжних клапанів 3 та 4, що описує блок “Оператор 2”, тип якого задано логічною операцією І. Нероботоздатність клапанів позначено блоками “Базова подія 3” і “Базова подія 4”, а їх напрацювання до відмови розподілено за законом Вейбулла із параметрами α_3 і β_3 та α_4 і β_4 . Тривалість ремонтування запобіжних клапанів вважаємо розподіленою експоненціально із параметром μ .

У гідравлічній станції відбувається один динамічний процес – зміна навантаження резервного клапана 4 залежно від стану основного клапана 3. Для опису цього процесу введемо у структуру динамічного дерева відмов блок “Оператор 3”, який є повторювачем логічного сигналу, і задамо у ньому умову зміни навантаження. Якщо на вхід блока подається логічний сигнал ХИБНО, тобто основний запобіжний клапан роботоздатний, то інтенсивність напрацювання резервного запобіжного клапана, який задає блок “Базова подія 4”, корегуємо коефіцієнтом k .

Модель станів та подій. За поданим вище динамічним деревом відмов гідравлічної станції згідно із формалізованими правилами [9] складено модель станів та подій. Така модель математично описує стани, в яких може перебувати си-

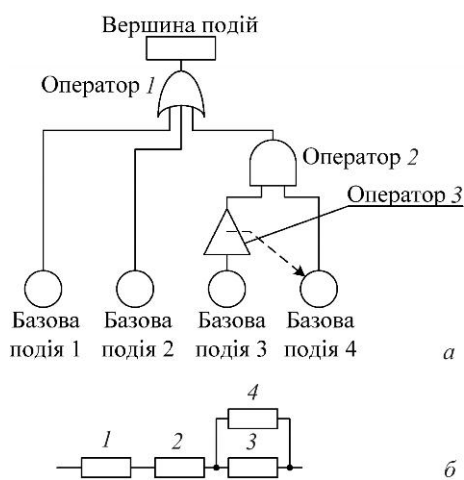


Рис. 2. Динамічне дерево відмов (а) та структурна схема надійності (б) гідравлічної станції.

стема, та події, які у ній можуть відбуватися, у проекційному зв'язку до процесів, що у ній протікають. Граф такої моделі подано на рис. 3, а її параметри – у таблиці.

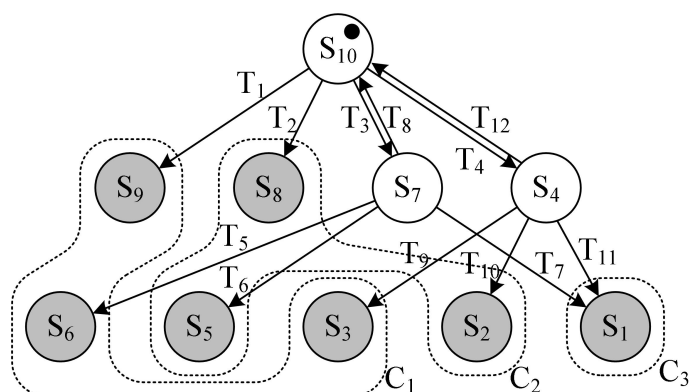


Рис. 3. Граф станів та переходів гідравлічної станції.

У моделі станів та подій процес напруження для електричного двигуна I позначено як P_1 , для гідравлічного насоса 2 – як P_2 , для основного запобіжного клапана 3 – як P_3 та для резервного 4 – як P_4 . Процес ремонтування для основного запобіжного клапана позначено як P_5 , а для резервного – як P_6 .

Параметри моделі станів та подій гідравлічної станції

| № | Опис станів | | | | | | | | Опис подій | | | |
|----|-----------------|----------------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | поч. стан | графічний опис стану | коефіцієнти масштабування | | | | | | Y | назва події | заверш. процес | кінц. стан |
| | | | P ₁ | P ₂ | P ₃ | P ₄ | P ₅ | P ₆ | | | | |
| 1 | S ₁₀ | | 1 | 1 | 1 | k | 0 | 0 | 1 | T ₁ | P ₁ | S ₉ |
| 2 | | | | | | | | | | T ₂ | P ₂ | S ₈ |
| 3 | | | | | | | | | | T ₃ | P ₃ | S ₇ |
| 4 | | | | | | | | | | T ₄ | P ₄ | S ₄ |
| 5 | S ₉ | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | – | – | – |
| 6 | S ₈ | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | – | – | – |
| 7 | S ₇ | | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | T ₅ | P ₁ | S ₆ |
| 8 | | | | | | | | | | T ₆ | P ₂ | S ₅ |
| 9 | | | | | | | | | | T ₇ | P ₄ | S ₁ |
| 10 | | | | | | | | | | T ₈ | P ₅ | S ₁₀ |
| 11 | S ₆ | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | – | – | – |
| 12 | S ₅ | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | – | – | – |
| 13 | S ₄ | | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | T ₉ | P ₁ | S ₃ |
| 14 | | | | | | | | | | T ₁₀ | P ₂ | S ₂ |
| 15 | | | | | | | | | | T ₁₁ | P ₃ | S ₁ |
| 16 | | | | | | | | | | T ₁₂ | P ₆ | S ₁₀ |
| 17 | S ₃ | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | – | – | – |
| 18 | S ₂ | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | – | – | – |
| 19 | S ₁ | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | – | – | – |

го другого моментів фактичного розподілу процесу та його допоміжної марковської моделі. Вважаємо, що параметри допоміжної марковської моделі для процесу $P_1\{\alpha_1, \beta_1\}$ становлять $\{A_1, p_1(0), C_1\}$, для $P_2\{\alpha_2, \beta_2\} - \{A_2, p_2(0), C_2\}$, для $P_3\{\alpha_3, \beta_3\} - \{A_3, p_3(0), C_3\}$, для $P_4\{\alpha_4, \beta_4\} - \{A_4, p_4(0), C_4\}$, для $P_5\{\mu\} - \{A_5, p_5(0), C_5\}$ та для $P_6\{\mu\} - \{A_6, p_6(0), C_6\}$. Відповідно компоненти марковської моделі усієї системи обчислили згідно з поданими нижче формулами, зокрема, для роботоzдатного стану S_{10} :

$$A_{S_{10}} = A_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6 + E_1 \otimes A_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6 + \\ + E_1 \otimes E_2 \otimes A_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6 + k E_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes A_4 \otimes E_5 \otimes E_6, \\ p_{S_{10}}(0) = p_1(0) \otimes p_2(0) \otimes p_3(0) \otimes p_4(0) \otimes p_5(0) \otimes p_6(0),$$

де \otimes – оператор тензорного множення; E_1 – E_6 – одиничні матриці, розмірність яких дорівнює розмірності матриць A_1 – A_6 .

Для роботоzдатного стану S_7 :

$$A_{S_7} = A_1 \otimes E_2 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6 + E_1 \otimes A_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6 + \\ + E_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes A_4 \otimes E_5 \otimes E_6 + E_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes A_5 \otimes E_6.$$

Для роботоzдатного стану S_4 :

$$A_{S_4} = A_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6 + E_1 \otimes A_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6 + \\ + E_1 \otimes E_2 \otimes A_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6 + E_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes A_6.$$

Для подій T_1, T_5 та T_9 , спричинених завершенням процесу P_1 ,

$$A_{T_1} = A_{T_5} = A_{T_9} = p_1 C_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6.$$

Для подій T_2, T_6 та T_{10} , зумовлених завершенням процесу P_2 ,

$$A_{T_2} = A_{T_6} = A_{T_{10}} = E_1 \otimes p_2 C_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6.$$

Для подій T_3 та T_{11} , викликаних завершенням процесу P_3 ,

$$A_{T_3} = A_{T_{11}} = E_1 \otimes E_2 \otimes p_3 C_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6.$$

Для подій T_4 та T_7 , спричинених завершенням процесу P_4 ,

$$A_{T_7} = E_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes p_4 C_4 \otimes E_5 \otimes E_6,$$

$$A_{T_4} = k A_{T_7}.$$

Для події T_8 , зумовленої завершенням процесу P_5 ,

$$A_{T_8} = E_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes p_5 C_5 \otimes E_6.$$

Для події T_{12} , викликаній завершенням процесу P_6 ,

$$A_{T_{12}} = E_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes p_6 C_6.$$

У матриці C одиничний вектор-рядок I має розмірність, яка дорівнює добутку розмірностей усіх матриць інтенсивності переходів A_1 – A_6 . Цю матрицю складено так, щоб три її рядки відповідали ймовірнісним характеристикам причин нероботоzдатності системи C_1 – C_3 . Одержана модель містить 160 рівнянь.

Ймовірнісні характеристики системи. Для елементів гідравлічної станції взято такі параметри: $\alpha_1 = 2,0 \cdot 10^5$ год, $\beta_1 = 1,1$; $\alpha_2 = 1,0 \cdot 10^5$ год, $\beta_2 = 1,2$; $\alpha_3 = \alpha_4 = 1,0 \cdot 10^3$ год, $\beta_3 = \beta_4 = 1,3$, інтенсивність відновлення $\mu = 0,02$ 1/год. На основі розщепленої однорідної марковської моделі обчислено ймовірнісні характеристики причин нероботоzдатності гідравлічної станції. На рис. 4 подано сімейство цих ймовірнісних кривих за умови зміни коефіцієнта k .

Коефіцієнт k вказує, наскільки зменшується інтенсивність зношування резервного запобіжного клапана у полегшеному режимі порівняно із номінальним. Він набуває значень у межах від 0 до 1. Суцільні криві 1–5 відповідають ймовірностям нероботоздатності системи внаслідок відмови обох запобіжних клапанів. Штрихові криві 6 і 7 – ймовірностям нероботоздатності системи внаслідок відмови гідравлічного насоса, а штрих-пунктирні криві 8 і 9 – внаслідок відмови електричного двигуна. Криві 1, 6 та 8 відповідають $k = 0$; 2 – $k = 0,25$; 3 – $k = 0,50$; 4 – $k = 0,75$, а криві 5, 7 і 9 – $k = 1$.

Як видно із рис. 4, зі збільшенням коефіцієнта k у граничних межах ймовірнісна характеристика нероботоздатності системи внаслідок відмови запобіжних клапанів зростає із лінійним кроком у діапазоні, обмеженому кривими 1 та 5, а ймовірнісні характеристики нероботоздатності системи внаслідок відмови електричного двигуна, а також через відмову гідравлічного насоса, мають тенденцію до незначного спадання у діапазонах, обмежених кривими 6 і 7 та 8 і 9. Показано, що залежно від значення коефіцієнта k та досліджуваного часового інтервалу відносний внесок нероботоздатності системи внаслідок відмови запобіжних клапанів у загальну нероботоздатність системи змінюється.

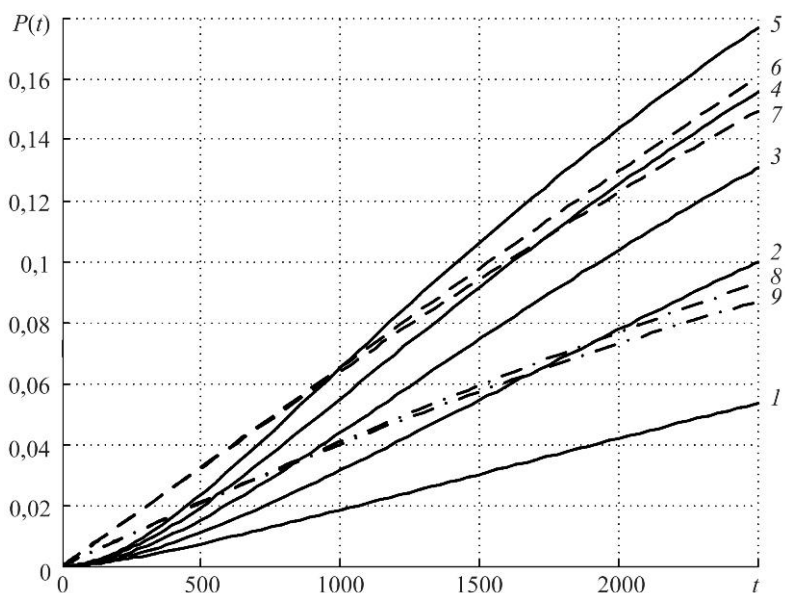


Рис. 4. Криві ймовірнісних характеристик причин нероботоздатності системи.

Зокрема, для $k = 0$ вказана нероботоздатність є третя за пріоритетом, для $k = \{0,25; 0,5; 0,75\}$, а також $k = 1,0$ за напрацювання менше 1000 год – друга і для $k = 1,0$ за напрацювання понад 1000 год – перша. Одержана марковська модель жорстка, що зумовлено розкидом параметрів процесів напрацювання та ремонтування, особливістю методу розщеплення простору станів та впливом коефіцієнта k .

ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель надійності гідравлічної станції, призначену для кількісного аналізу причин її нероботоздатності. Надійність станції математично описано динамічним деревом відмов, в якому задано логічну умову зміни навантаження резервного запобіжного клапана. Ймовірнісні характеристики системи визначено за марковською моделлю, в якій на основі тензорних виразів розщеплення простору станів враховано вплив перерозподілу навантаження між

елементами гідравлічної станції, тривалість напрацювання до відмови яких розподілена за законом Вейбулла. За цією моделлю проаналізовано вплив зміни коефіцієнта полегшення навантаження резервного запобіжного клапана на причини нероботоздатності системи. Виявлено, що з його збільшенням може змінитися найімовірніша причина нероботоздатності системи. Властивості системи не можна адекватно кількісно проаналізувати ні на основі логіко-ймовірнісної оцінки, ні використовуючи звичайну однорідну марковську модель надійності.

Подальші дослідження скеровані на розроблення моделі надійності гідравлічної станції, в якій враховано вплив перерозподілу навантаження між її елементами, які функціонують за алгоритмом навантажувального резервування.

1. *Andrews J. D., Poole J., Chen W. H.* Fast mission reliability prediction for Unmanned Aerial Vehicles // *Reliability Engng & System Safety*. – 2013. – **120**. – P. 3–9.
2. *Integrated* assessment of failure probability of the district heating network / M. Valinčius, I. Žutaitė, G. Dundulis et al. // *Reliability Engng & System Safety*. – 2015. – **133**. – P. 314–322.
3. *Torres J., Brumbelow K., Guikema S.* Risk classification and uncertainty propagation for virtual water distribution systems // *Reliability Engng&System Safety*. – 2009. – **94**, № 8. – P. 1259–1273.
4. *Qing Shuang, Mingyuan Zhang, Yongbo Yuan.* Node vulnerability of water distribution networks under cascading failures // *Reliability Engng & System Safety*. – 2014. – **124**, № 8. – P. 132–141.
5. *Moghaddass R., Zuo M. J., Wenbin Wanb.* Availability of a general k-out-of-n:G system with non-identical components considering shut-off rules using quasi-birth–death process // *Reliability Engng & System Safety*. – 2011. – **96**, № 4 – P. 489–496.
6. *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 et al. // *Reliability Engng & System Safety*. – 2014. – **121**, № 1. – P. 250–262.
7. *Shcherbovskykh S., Lozynsky O., Marushchak Ya.* Failure intensity determination for system with standby doubling // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2011. – **87**, № 5. – P. 160–162.
8. *Mandziy B., Lozynsky O., Shcherbovskykh S.* Mathematical model for failure cause analysis of electrical systems with load-sharing redundancy of component // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2013. – **89**, № 11. – P. 244–247.
9. *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.

Одержано 05.02.2015