

А. П. КУШНІР, канд. техн. наук, доц. ЛДУБЖД;

В. М. ОКСЕНТЮК, канд. техн. наук, директор СКБ ЕМС НУ «ЛП»;

Т. О. СТЕФАНОВИЧ, канд. техн. наук, доц. НУ «ЛП»;

С. В. ЩЕРБОВСЬКИХ, д-р. техн. наук, с.н.с. НУ «ЛП»

МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПРИЧИН НЕПРАЦЕЗДАТНОСТІ СИСТЕМИ ПОВОРОТУ ПЛАТФОРМИ ПОЖЕЖНОГО АВТОПІДЙОМНИКА

Вступ. Для проведення рятувальних робіт та подачі вогнегасної речовини безпосередньо в осередок пожежі застосовують спеціальну пожежно-аварійну техніку, зокрема, висотні автопідйомники та автодрабини. До складу висотних автопідйомників та автодрабин входить велика кількість систем, від надійної роботи яких залежить життя та здоров'я рятувальників та потерпілих. Однією із таких систем є система повороту платформи, яка характеризується змінним моментом інерції, змінними статичним і динамічним навантаженням, великою масою. Непрацездатність цієї системи унеможливує проведення пожежно-рятувальних робіт.

Постановка проблеми. Під час проектування нових та модернізації існуючих систем повороту платформи пожежного автопідйомника важливим етапом є забезпечення заданого рівня їх надійності [1]. Цей етап проектування зводиться не лише до визначення сумарного показника надійності, але й передбачає аналіз причин непрацездатності таких систем та розроблення рекомендацій щодо підвищення їх надійності. Базовою складовою системи повороту платформи є привод. В такій системі навантаження елементів гідравлічного та ручного приводів залежить від стану гідравлічного приводу. Якщо гідравлічний привод працездатний, то ручний перебуває у ненавантаженому стані. Якщо гідравлічний привод непрацездатний, то ті його елементи, які залишилися працездатними, є ненавантаженими. Дана публікація присвячена актуальній проблемі підвищення точності аналізу причин непрацездатності системи повороту платформи шляхом врахування впливу зміни навантаження елементів, яке зумовлено зміною стану функціонування гідравлічного приводу.

Аналіз останніх досліджень. Для визначення ймовірнісних характеристик причин непрацездатності систем виділяємо два підходи [2]. Перший ґрунтується на складанні дерева відмов системи, яке аналізують логіко-ймовірнісним методом [3, 4]. Зміст цього підходу полягає у тому, що на основі дерева відмов складають логічні умови, які відповідають причинам непрацездатності системи, а потім їх перетворюють у ймовірнісні вирази. Такий підхід простий у застосуванні, проте на його основі не можна коректно враховувати процеси, пов'язані зі зміною навантаження елементів. Другий підхід базується на побудові динамічного дерева відмов системи, для аналізу якого застосовують кілька різних методів. Зокрема, в [5] динамічне дерево відмов перетворюють у мережу Петрі, кількісний аналіз якої виконують методом Монте-Карло. Недоліком цього методу є спотворення результатів моделювання стохастичними флуктуаціями, а також значні часові затрати на обчислення. В [6, 7] динамічне дерево відмов перетворюють у марковську модель, яку обчислюють чисельним методом. Недолік цього методу полягає у високій розмірності марковської моделі, а також у її обмеженні експоненціальним розподілом. Для послаблення обмеження експоненціальним розподілом необхідно застосувати розщеплення простору станів [8–10], яке забезпечує адекватне врахування запам'ятовування передісторії напруження елементів системи за навантаженням.

У цій статті розв'язано такі завдання:

- математично описано надійність системи повороту платформи пожежного автопідйомника на основі динамічного дерева відмов;
- побудовано модель станів та подій і марковську модель системи повороту платформи;
- визначено кількісні характеристики причин непрацездатності системи повороту платформи.

Матеріали дослідження.

Опис системи та її динамічне дерево відмов. Нехай досліджувана у роботі система повороту платформи складена із п'яти елементів: гідравлічний насос 1, гідравлічний розподільник 2, гідравлічний двигун 3, ручний привод 4 та редуктор 5. Структурна схема надійності системи подана на рис. 1.

Гідравлічний привод, який складається із гідравлічного насоса 1, гідравлічного розподільника 2 та гідравлічного двигуна 3, утворюють основну підсистему, а ручний привод 4 — резервну. Обидві підсистеми, незалежно одна від одної, можуть привести у рух шестерню редуктора 5, яка забезпечує обертання платформи пожежного автопідйомника. Якщо гідравлічний привод працездатний, то ручний перебуває в холодному резерві. Вважаємо, що у холодному резерві ручний привод відмовити не може. Якщо гідравлічний привод непрацездатний, то його функцію тимчасово виконує ручний привод, який переходить у навантажений режим.

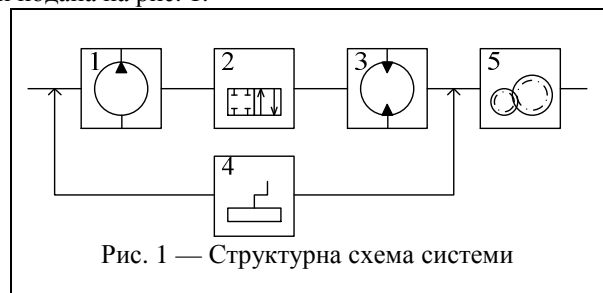


Рис. 1 — Структурна схема системи

Вважаємо, що у непрацездатному гідравлічному приводі ті елементи, які залишились працездатними, переходять у ненавантажений режим і відмовити у такому стані не можуть. Після ремонтування відновлений елемент за експлуатаційними характеристиками вважаємо аналогічним новому, а інші працездатні елементи такими, що мають попереднє напрацювання.

Формалізуємо надійність системи динамічним деревом відмов, структура якого подана на рис. 2. Динамічне дерево відмов є математичною моделлю, яка описує умову непрацездатності системи та умови зміни навантаження між її елементами на основі блоків, які позначають логічні операції та операції відношення.

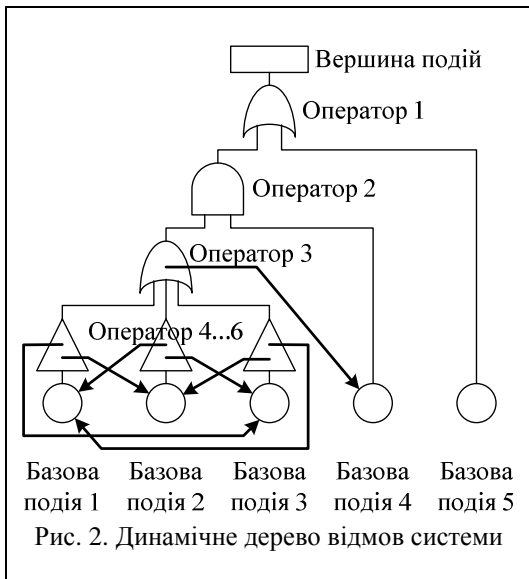


Рис. 2. Динамічне дерево відмов системи

Непрацездатність системи позначена блоком «Вершина подій». Така подія є катастрофічною, тобто поки вона не відбулась, допускається ремонтування будь-якого елемента системи. Якщо непрацездатність наступила, то подальше ремонтування елементів системи не розглядаємо. Непрацездатність системи настає, якщо непрацездатний привод або редуктор, що описано блоком «Оператор 1», тип якого задано логічною операцією АБО. Непрацездатність приводу настає, якщо непрацездатні одночасно гідравлічний та ручний приводи, що описано блоком «Оператор 2», тип якого задано логічною операцією І. Непрацездатність гідравлічного приводу настає у разі відмови хоча б одного із його елементів 1–3, що описано блоком «Оператор 3», тип якого задано логічною операцією АБО. Непрацездатність гідравлічного насоса 1, гідравлічного розподільника 2 та гідравлічного двигуна 3 позначено блоками «Базова подія 1»–«Базова подія 3», а напрацювання таких елементів до відмови розподілено за законом Вейбулла із параметрами α_1 і β_1 , α_2 і β_2 , α_3 і β_3 . Непрацездатність ручного приводу 4 позначено блоком «Базова подія 4», а його напрацювання до відмови розподілено

за законом Вейбулла із параметрами α_4 і β_4 . В свою чергу, непрацездатність редуктора 5 позначено блоком «Базова подія 5», а його напрацювання до відмови розподілено за законом Вейбулла із параметрами α_5 і β_5 .

У системі відбуваються з точки зору надійності два динамічних явища:

- зміна навантаження ручного приводу залежно від стану гідравлічного приводу;
- зміна навантаження елементів гідравлічного приводу залежно від стану гідравлічного приводу в цілому.

Для опису першого явища задамо у блоці «Оператор 3» умови зміни навантаження. Якщо на вхід цього блоку подається логічний сигнал ХИБНО, тобто гідравлічний привод працездатний, то інтенсивність процесу напрацювання ручного приводу 4, заданого блоком «Базова подія 4», становить 0.

Для опису другого явища введемо у структуру динамічного дерева відмов блоки «Оператор 4», «Оператор 5» та «Оператор 6», які є повторювачами логічного сигналу, і задамо у них умови зміни навантаження. Якщо на вхід блоку «Оператор 4» подається логічний сигнал ІСТИННО, тобто гідравлічний насос 1 непрацездатний, то інтенсивність процесу напрацювання гідравлічного розподільника 2, заданого блоком «Базова подія 2» та гідравлічного двигуна 3, заданого блоком «Базова подія 3», становить 0. Для двох наступних повторювачів формуємо логічні умови зміни навантаження за аналогією. Якщо на вхід блоку «Оператор 5» подається логічний сигнал ІСТИННО, тобто гідравлічний розподільник 2 непрацездатний, то інтенсивність процесу напрацювання гідравлічного насоса 1, заданого блоком «Базова подія 1», та гідравлічного двигуна 3, заданого блоком «Базова подія 3», становить 0. І, відповідно, якщо на вхід блоку «Оператор 6» подається логічний сигнал ІСТИННО, тобто гідравлічний двигун 3 непрацездатний, то інтенсивність процесу напрацювання гідравлічного насоса 1, заданого блоком «Базова подія 1», та гідравлічного розподільника 2, заданого блоком «Базова подія 2», становить 0.

Модель станів та подій. На підставі поданого вище динамічного дерева відмов системи згідно із формалізованими правилами [10] складено модель станів та подій системи повороту платформи. Така модель є математичним описом станів, в яких може перебувати система, та подій, 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 табл. 1. У моделі станів та подій процеси напрацювання і ремонтування для гідравлічного насоса 1 позначено як P_1 та P_6 , для гідравлічного розподільника 2 — P_2 та P_7 та для гідравлічного двигуна 3 — P_3 та P_8 . Процес напрацювання для ручного приводу 4 позначено як P_4 та для редуктора — P_5 . Оскільки відмова ручного приводу та редуктора призводить одразу до катастрофічної відмови системи, то ремонтування цих елементів у даній моделі не розглядаємо. На рис. 3 працездатні стани системи позначені колом, яке зафарбоване білим, а непрацездатні стани — колом, яке зафарбоване сірим. Система перебуває в одинадцяти станах, із яких чотири відповідають працездатності — S_8 – S_{11} . Непрацездатні стани згруповано у чотири множини C_1 – C_4 , кожна із яких відповідає окремій причині непрацездатності системи. Перша множина C_1 відповідає непрацездатності системи внаслідок відмови гідравлічного двигуна та ручного приводу. В таку множину входить один непрацездатний стан S_7 . Друга множина C_2 — внаслідок відмови гідравлічного розподільника та ручного приводу, і включає один непрацездатний стан S_6 ; третя множина C_3 — внаслідок відмови гідравлічного двигуна та ручного

приводу, і включає один непрацездатний стан S_5 ; та четверта множина C_4 — внаслідок відмови редуктора, і включає чотири непрацездатних стани S_1 – S_4 .

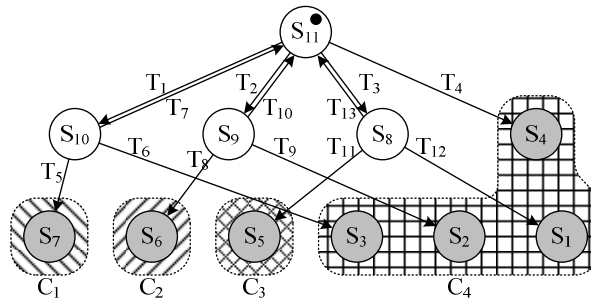


Рис. 3. Граф станів та переходів системи

У системі відбувається тринадцять подій, із яких сім спричиняють катастрофічну відмову — $T_4, T_5, T_6, T_8, T_9, T_{11}$ та T_{12} . Параметрами станів є значення коефіцієнтів масштабування для процесів P_1 – P_8 та логічна функція y , яка набуває значення «1», якщо система працездатна, та «0» — якщо ні. Параметрами подій є назва початкового стану, назва процесу, який завершився, та назва кінцевого стану.

Таблиця 1 — Параметри моделі станів та подій системи

№	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	P_7	P_8				
1	S ₁₁		1	1	1	0	1	0	0	0	1	T ₁	P ₁	S ₁₀
2			T ₂	P ₂	S ₉									
3			T ₃	P ₃	S ₈									
4			T ₄	P ₅	S ₈									
5	S ₁₀		0	0	0	1	1	0	0	1	T ₅	P ₄	S ₃	
6			T ₆	P ₅	S ₇									
7			T ₇	P ₆	S ₈									
8	S ₉		0	0	0	1	0	1	0	1	T ₈	P ₄	S ₂	
9			T ₉	P ₅	S ₇									
10			T ₁₀	P ₇	S ₈									
11	S ₈		0	0	0	1	0	0	1	1	T ₁₁	P ₄	S ₁	
12			T ₁₂	P ₅	S ₇									
13			T ₁₃	P ₈	S ₈									
14	S ₇		0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	
15	S ₆		0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	
16	S ₅		0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	
17	S ₄		0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	
18	S ₃		0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	
19	S ₂		0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	
20	S ₁		0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	

Грунтуючись на моделі станів та подій системи повороту платформами на основі тензорних виразів [10] сформована розщеплена однорідна марковська модель, яка містить 352 диференціальних рівняння.

Ймовірнісні характеристики системи. Значення параметрів для елементів системи повороту платформи взято такими: $\alpha_1 = 4\,000$ год., $\alpha_2 = 6000$ год., $\alpha_3 = 5\,000$ год. $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 1.2$; $\alpha_4 = 3000$ год., $\beta_4 = 1.3$; $\alpha_5 = 200\,000$ год., $\beta_4 = 1.1$, інтенсивність відновлення $\mu = 0.02$ 1/год. На основі розщепленої однорідної марковської моделі обчислено ймовірнісні характеристики причин непрацездатності системи, які подано на рис. 4, а ймовірнісні показники для тривалості експлуатації 10 000 год. — у табл. 2. Крива 1 відповідає ймовірності непрацездатності системи внаслідок відмови гідравлічного насоса та ручного приводу, крива 2 — гідравлічного розподільника та ручного приводу, крива 3 — гідравлічного двигуна та ручного приводу і крива 4 — редуктора. На підставі одержаних ймовірнісних показників робимо висновок, що для зменшення ймовірності непрацездатності системи повороту платформ для моменту часу 10 000 год. необхідно вжити заходів щодо підвищення безвідмовності редуктора, оскільки його відмова є найімовірнішою причиною відмови системи із відносною вагою 46.55 %.

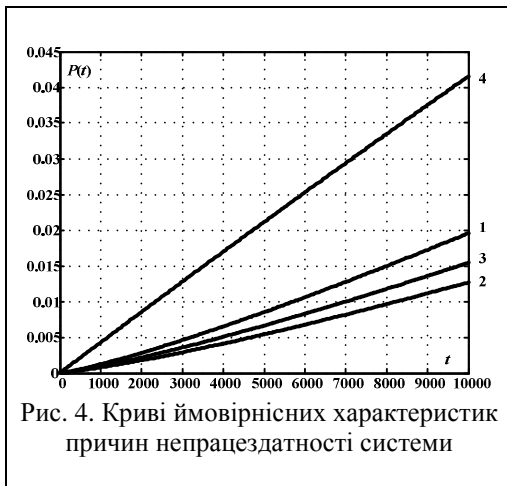


Рис. 4. Криві ймовірнісних характеристик причин непрацездатності системи

Таблиця 2 — Ймовірнісні показники причини непрацездатності системи

№	Опис причини непрацездатності		Ймовірність причини	Відносна вага причини
	За елементами	За станами		
C ₄	Редуктор	S ₁ –S ₄	0.041530	46.55 %
C ₁	Гідравлічний насос — ручний привод	S ₇	0.019563	21.93 %
C ₃	Гідравлічний двигун — ручний привод	S ₅	0.015435	17.30 %
C ₂	Гідравлічний розподільник — ручний привод	S ₆	0.012684	14.22 %

Висновки. У статті розроблено математичну модель надійності системи повороту платформи пожежного автопідійомника, призначену для кількісного аналізу причин її непрацездатності. Надійність системи математично описано динамічним деревом відмов, в якому задано логічні умови зміни навантаження елементів системи залежно від стану гідравлічного приводу. Ймовірнісні характеристики системи визначено за марковською моделлю, в якій на основі тензорних виразів розщеплення простору станів враховано зміну навантаження між елементами системи, тривалість напрацювання до відмови яких розподілена за законом Вейбулла. Показано, що найімовірнішою причиною непрацездатності системи є відмова редуктора.

Подальші дослідження скеровані на розроблення удосконаленої моделі надійності системи повороту платформи, в якій буде враховано такі елементи, як резервний ручний насос та обладнання, яке приводить у рух гідравлічний насос.

Список літератури: 1. Автодрабини пожежні. Загальні технічні вимоги та методи випробовування (EN 14043:2005, IDT): ДСТУ EN 14043:2008. — [Чинний від 2008-12-26]. — К., Держспоживстандарт України, 2008. — 176 с. 2. *Chiacchio F.* Dynamic fault trees resolution: A conscious trade-off between analytical and simulative approaches [Text] / *F. Chiacchio, L. Compagno, D. D'Urso, et al.* // Reliability Engineering & System Safety. — 2011. — Vol. 96, No. 11. — P. 1515–1526. 3. *Vega M.* Algorithm to evaluate substation reliability with cut and path sets [Text] / *M. Vega, H. G. Sarmiento* // Industry Applications, IEEE Transactions on. — 2008. — Vol. 44, No. 6. — P. 1851–1858. 4. *Wei-Chang Yeh.* A new algorithm for generating minimal cut sets in k-out-of-n networks [Text] / *Wei-Chang Yeh* // Reliability Engineering & System Safety. — 2006. — Vol. 91, No 1. — P. 36–43. 5. *Khanh Nguyen T. P.* Method for evaluating an extended Fault Tree to analyse the dependability of complex systems: Application to a Satellite-based railway system [Text] / *T. P. Khanh Nguyen, Julie Beugina, Juliette Marais* // Reliability Engineering & System Safety. — 2015. — Vol. 133. — P. 300–313. 6. *Manno G.* Conception of Repairable Dynamic Fault Trees and resolution by the use of RAATSS, a Matlab® toolbox based on the ATS formalism [Text] / *G. Manno, F. Chiacchio, L. Compagno, D. D'Urso, N. Trapani* // Reliability Engineering & System Safety. — 2014. — Vol. 121, No 1. — P.250–262. 7. *Daniele Codetta-Raiteri.* Integrating several formalisms in order to increase Fault Trees' modeling power [Text] / *Daniele Codetta-Raiteri* // Reliability Engineering & System Safety. — 2011. — Vol. 96, No. 5. — P. 534–544. 8. *Shcherbovskiykh S.* Failure intensity determination for system with standby doubling [Text] / *S. Shcherbovskiykh, O. Lozynsky, Ya. Marushchak* // Przegląd Elektrotechniczny. — 2011. — Vol. 87, No 5. — P. 160–162. 9. *Mandziy B.* Mathematical model for failure cause analysis of electrical systems with load-sharing redundancy of component [Text] / *B. Mandziy, O. Lozynsky, S. Shcherbovskiykh* // Przegląd Elektrotechniczny. — 2013. — Vol. 89, No 11. — P. 244–247. 10. *Щербовських С. В.* Математичні моделі та методи для визначення характеристик надійності багатотермінальних систем із урахуванням перерозподілу навантаження: монографія [Текст] / С. В. Щербовських. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. — 296 с.

Bibliography (transliterated): 1. Fire Alarm Systems and notification. Part 14. Guidelines for building, designing, installing, commissioning, operating manual and maintenance (CEN/TS 54-14: 2004, IDT). DSTU-H CEN/TS 54-14: 2009 (2004) Kyiv: Derzspozuvstandart of Ukraine, 2004. 2. *Chiacchio, F., Compagno, L., D'Urso, D. et al.* (2011). Dynamic fault trees resolution: A conscious trade-off between analytical and simulative approaches, Reliability Engineering & System Safety, 96, 11, 1515–1526. 3. *Vega, M., Sarmiento, H. G.* (2008). Algorithm to evaluate substation reliability with cut and path sets, Industry Applications, IEEE Transactions on, 44, 6, 1851–1858. 4. *Wei-Chang Yeh.* (2006). A new algorithm for generating minimal cut sets in k-out-of-n networks, Reliability Engineering & System Safety, 91, 1, 36–43. 5. *Khanh Nguyen, T. P., Julie Beugina, Juliette Marais.* (2015) 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, 133, 300–313. 6. *Manno, G., Chiacchio, F., Compagno, L., D'Urso, D., Trapani, N.* (2014). Conception of Repairable Dynamic Fault Trees and resolution by the use of RAATSS, a Matlab® toolbox based on the ATS formalism. Reliability Engineering & System Safety, 121, 1, 250–262. 7. *Daniele Codetta-Raiteri.* (2011). Integrating several formalisms in order to increase Fault Trees' modeling power. Reliability Engineering & System Safety, 96, 5, 534–544. 8. *Shcherbovskiykh, S., Lozynsky, O., Marushchak, Ya.* (2011). Failure intensity determination for system with standby doubling. Przegląd Elektrotechniczny, 87, 5, 160–162. 9. *Mandziy, B., Lozynsky, O., Shcherbovskiykh, S.* (2013). Mathematical model for failure cause analysis of electrical systems with load-sharing redundancy of component. Przegląd Elektrotechniczny, 89, 11, 244–247. 10. *Shcherbovskiykh, S.* (2012). Matematichni modeli ta metodi dlya viznachennya harakteristik nadiynosti bahatoterminalnih system iz urahuvannyam pererozpodilu navantazhennya: monohrafiya, Lviv, Vidavnistvo Lvivska Politehnika, 296.

Надійшло (received) 30.06.2015