

**Bibliography (transliterated):**1. *Nepomnyashhij, I. L.* (1963). Koksovye mashiny, ix konstrukcii i raschety. *Moscow: Metallurgizdat*, 388.2. *Shepelev, I. G.* (1966). Oborudovanie koksoximicheskix zavodov. *Moscow: Metallurgiya*, 332.3. *Virozub, I. V., Taxtamyshev, E. Ya., Ciperovich, M. V.* (1952). Mexanicheskoe oborudovanie koksoximicheskix zavodov. *Moscow: Metallurgizdat*, 292.4. *Nepomnyashhij, I. L.* (1962). Mexanizaciya i avtomatizaciya na koksoximicheskom zavode. *Moscow: Metallurgizdat*, 312.5. *Karavaev, N. M., Pilskij, I. Ya., Shepelev, I. G.* (1955). Mashiny i apparaty koksoximicheskogo proizvodstva. *Moscow: Metallurgizdat*, 288.6. Spravochnik Koksoximika (1965). T. I, II, III. *Moscow: Metallurgiya*.7. *Rindyaev, V. I.* (2014). Shtanga vishtovxuvalnogo pristroyu koksovishtovxuvacha. Patent Ukraini na korisnu model № 87302 MPK S 10 V 33/10 (2006.01). Zayavl. 19.02.2013; opubl. 10.02.2014. Byul. №3.8. *Filipenko E. S. i dr.* (1982). A.S. SSSR № 962291, Kl. S 10 V 33/10. Ustrojstvo dlya vytalkivaniya koksa iz koksovyx pechej. Zayavl. 19.11.1979; opubl. 30.09.1982. Byul. № 36.9. *Chamov, A. V., Rogozina, T. V.* (1992). A. S. SSSR № 173698 A1, Kl. S 10 V 7/00. Shtanga vytalkivayushhego ustrojstva koksovytalkivatelya. Zayavl. 07.03.1989; opubl. 30.05.1992. Byul. № 20.10. *Ivanov, M. N., Ivanov, V. N.* (1975). Detali mashin. *Moscow: Vysshaya shkola*, 551.

*Поступила (received) 18.04.2015*

## УДК 519.248

**Т. О. СТЕФАНОВИЧ**, канд. техн. наук, доц., НУ «Львівська політехніка»;  
**В. М. ОКСЕНТЮК**, канд. техн. наук, директор спеціального конструкторського бюро електромеханічних систем, НУ «Львівська політехніка»;  
**С. В. ЩЕРБОВСЬКИХ**, д-р техн. наук, с. н. с., науково-дослідної групи ДБ/ТРИКАФ, НУ «Львівська політехніка»

### РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПРИЧИН НЕПРАЦЕЗДАТНОСТІ ГІДРАВЛІЧНОЇ СТАНЦІЇ ЗІ СПАРЕНИМИ НАСОСАМИ

Запропоновано математичну модель надійності гідравлічної станції із спареними насосами. Модель адекватно враховує вплив перерозподілу навантаження між спареними насосами на ймовірнісні характеристики причин непрацездатності такої системи. Для математичного опису надійності застосовано динамічне дерево відмов, а для кількісного аналізу розщеплена однорідна марковська модель.

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

**Вступ.** Гідравлічна станція – це технічна система, яка перетворює енергію приводного двигуна у механічну енергію рідини та керує потоком цієї рідини. Відмова гідравлічної станції спричиняє непрацездатність гідравлічного приводу, і, відповідно, зупинку технологічного обладнання. Одним із способів підвищення надійності гідравлічного приводу є встановлення спарених насосів. Такі насоси працюють паралельно і, у випадку непрацездатності одного із них, інший тимчасово забезпечує працездатність системи. Крім того, спарені насоси можуть застосовуватися для зменшення шуму та моменту інерції гідравлічного приводу.

Під час проектування гідравлічної станції важливим етапом є забезпечення

прийняттю рівня її надійності. Цей етап проектування зводиться не лише до визначення інтегрального показника надійності, але й передбачає аналіз усіх причин її непрацездатності та розроблення рекомендацій щодо підвищення надійності. В гідравлічній станції зі спареними насосами навантаження кожного із насосів залежить від стану, в якому перебуває інший насос. Якщо один із гідравлічних насосів непрацездатний, то навантаження іншого зростає, що прискорює його зношування. Дана публікація присвячена актуальній проблемі підвищення точності аналізу причин непрацездатності гідравлічної станції шляхом врахування впливу зміни навантаження між спареними гідравлічними насосами.

**Аналіз останніх досліджень.** Для побудови моделей надійності гідравлічних станцій виділяємо наступні підходи. У працях [1, 2] застосовують дерева відмов, які базуються на логіко-ймовірнісному методі. Недолік такого підходу полягає у тому, що він не забезпечує адекватне врахування явищ, пов'язаних зі зміною навантаження, а також не розрізняє катастрофічні і некатастрофічні відмови елементів. У статтях [3, 4] використовують моделі надійності, які ґрунтуються на імітаційному моделюванні за методом Монте-Карло. Недолік цього підходу полягає у тому, що одержані результати спотворені флуктуаціями, амплітуда яких для робочого діапазону параметрів співмірна із значеннями досліджуваних характеристик. У працях [5, 6] використовують марковські моделі надійності, які базуються на аналізі простору станів. Основним недоліком таких моделей є обмеження експоненціальним розподілом, а також висока трудомісткість їх побудови.

У даній роботі для розв'язання поставленого завдання використано підхід, який ґрунтується на поєднанні динамічних дерев відмов та марковських моделей надійності. Для послаблення обмеження експоненціальним розподілом застосовуватимемо розщеплення простору станів [7–9], яке забезпечує врахування довільних розподілів і «запам'ятовування» передісторії напруцювання елементів системи за навантаженням.

*У цій статті розв'язано такі завдання:*

- математично описано надійність гідравлічної станції на основі динамічного дерева відмов;
- побудовано модель станів та подій і розщеплену однорідну марковську модель системи;
- визначено кількісні характеристики для усіх причин відмови гідравлічної станції та досліджено вплив на них коефіцієнта навантаження для резервного клапана тиску.

**Опис системи та її динамічне дерево відмов.** В структурі гідравлічної станції виділяємо чотири основних елементи: електричний двигун 1, з'єднані одним валом однакові гідравлічні насоси 2 та 3, а також запобіжний клапан 4 (рис. 1). Гідравлічна станція функціонує наступним чином. Електричний двигун 1 приводить в рух гідравлічні насоси 2 та 3.

Насос 2 через трубопровід 2.1 подає гідравлічну рідину із бака у

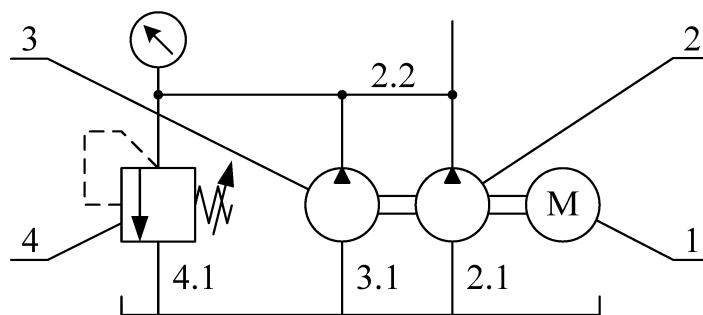


Рис. 1 – Структурна схема системи

робочу лінію

2.2. Насос 3 через трубопровід 3.1 подає гідравлічну рідину із бака у робочу лінію 2.2. Для уникнення підвищення тиску вище допустимого значення у лінії 2.2 встановлено запобіжний клапан 4, який надлишок гідравлічної рідини трубопроводом 4.1 повертає назад у бак. Гідравлічні насоси функціонують за алгоритмом навантажувального резервування. Якщо обидва насоси працездатні, то навантаження розподіляється між ними порівну, і вони працюють у номінальному режимі. Якщо один із насосів стає непрацездатним, то навантаження на інший подвоюється, і він тимчасово працює у перевантаженому режимі.

Формалізуємо надійність гідравлічної станції динамічним деревом відмов, структура якого подана на рис. 2. Звернемо увагу, що з точки зору надійності логічна структурна схема гідравлічної станції утворює послідовно-паралельне сполучення елементів. 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. Непрацездатність гідравлічної станції позначена блоком «Вершина подій». Вважаємо, що така подія є катастрофічною, тобто поки вона не відбулась, ремонтування будь-якого гідравлічного насоса можна виконати стільки разів, скільки у цьому виникає потреба. Відновлений насос за експлуатаційними характеристиками вважаємо аналогічним новому, а інший таким, що має попереднє напрацювання. Після настання відмови гідравлічної станції подальший її ремонт не розглядаємо.

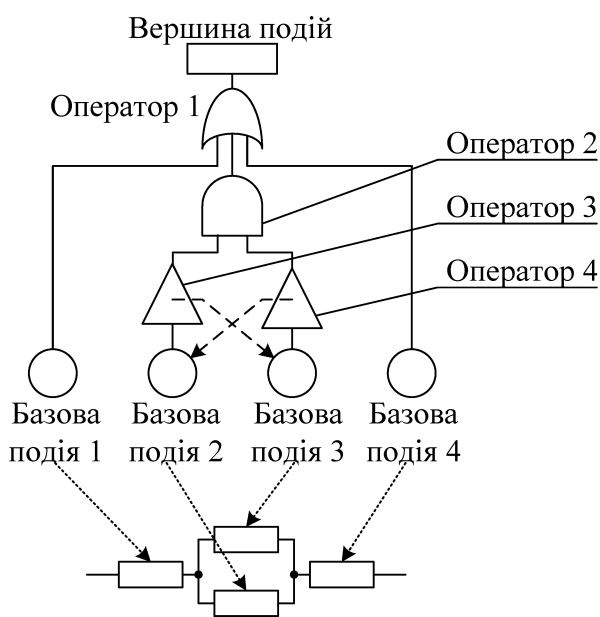


Рис. 2 – Динамічне дерево відмов та структурна схема надійності системи

Відмова гідравлічної станції відбувається, якщо настає хоча б одна із трьох подій, що описано блоком «Оператор 1», тип якого задано логічною операцією АБО. Перша подія настає у разі відмови електричного двигуна 1, що описано блоком «Базова подія 1». Вважаємо, що напрацювання до відмови двигуна розподілено за законом Вейбулла із параметрами  $\alpha_1$  і  $\beta_1$ . Друга подія відбувається внаслідок настання непрацездатності обох гідравлічних насосів 2 і 3, що описано блоком «Оператор 2», тип якого задано логічною операцією І. Непрацездатність насосів позначено блоками «Базова подія 2» і «Базова подія 3», а їх напрацювання до відмови розподілено за законом Вейбулла із параметрами  $\alpha_2$  і  $\beta_2$  та  $\alpha_3$  і  $\beta_3$ . Тривалість ремонтування гідравлічних насосів вважаємо розподіленою експоненціально із параметром  $\mu$ . Третя подія настає внаслідок відмови запобіжного клапана 4, що описано блоком «Базова подія 4». Вважаємо, що напрацювання до відмови клапана розподілено за законом Вейбулла із параметрами  $\alpha_4$  і  $\beta_4$ .

У гідравлічній станції відбувається два динамічних процеси, які полягають у взаємній зміні навантаження гідравлічних насосів 2 і 3 залежно від їх стану. Для

опису цих процесів введемо у структуру динамічного дерева відмов блоки «Оператор 3» і «Оператор 4», які є повторювачами логічного сигналу, і задамо у них умови зміни навантаження. Зокрема, якщо на вхід блоку «Оператор 3» подається логічний сигнал ІСТИННО, тобто гідравлічний насос 2 непрацездатний, то інтенсивність процесу напрацювання гідравлічного насоса 3, заданого блоком «Базова подія 3», збільшуємо в  $k_3$  разів. За аналогією, якщо на вхід блоку «Оператор 4» подається логічний сигнал ІСТИННО, тобто гідравлічний насос 3 непрацездатний, то інтенсивність процесу напрацювання гідравлічного насоса 2, заданого блоком «Базова подія 2», збільшуємо в  $k_2$  разів.

*Модель станів та подій.* На підставі поданого вище динамічного дерева відмов гідравлічної станції згідно із формалізованими правилами [10] складено модель станів та подій. 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 процес напрацювання для електричного двигуна 1 позначено як  $P_1$ , для першого гідравлічного насосу 2 –  $P_2$ , для другого гідравлічного насосу 3 –  $P_3$ , для запобіжного клапана 4 –  $P_4$ . Процес ремонтування для першого гідравлічного насоса позначено як  $P_5$ , а для другого гідравлічного насоса –  $P_6$ .

На рис. 3 працездатні стани системи позначені колом, яке зафарбоване білим, а непрацездатні стани — колом, яке зафарбоване сірим. Система перебуває у десяти станах, із яких три відповідають працездатності –  $S_6$ ,  $S_8$  та  $S_{10}$ . Непрацездатні стани згруповано у три множини, кожна із яких відповідає однаковій причині непрацездатності системи.

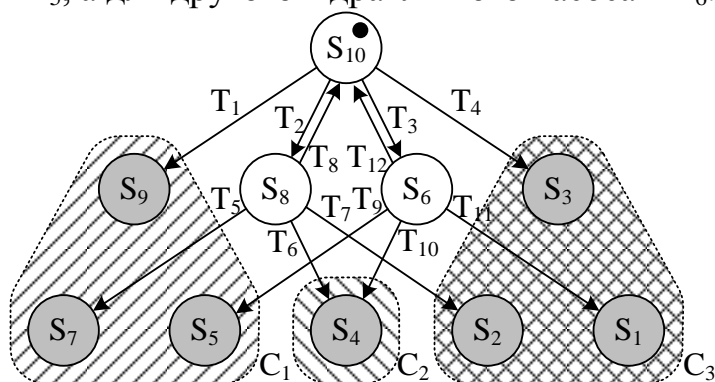


Рис. 3 - Граф станів та переходів системи

Перша множина  $C_1$  відповідає непрацездатності системи внаслідок відмови електричного двигуна. В цю множину входять непрацездатні стани  $S_5$ ,  $S_7$  та  $S_9$ . Друга множина  $C_2$  відповідає непрацездатності системи внаслідок відмови обох гідравлічних насосів, і містить лише один непрацездатний стан  $S_4$ . Третя множина  $C_3$  відповідає непрацездатності системи внаслідок відмови запобіжного клапана і включає у себе непрацездатні стани  $S_1$ ,  $S_2$  та  $S_3$ . У системі відбувається дванадцять подій, із яких вісім спричиняють катастрофічну відмову –  $T_1$ ,  $T_4$ ,  $T_5$ ,  $T_6$ ,  $T_7$ ,  $T_9$ ,  $T_{10}$  та  $T_{11}$ . Параметрами станів є значення коефіцієнтів масштабування для процесів  $P_1$ – $P_6$  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 гідравлічної станції

№	Опис станів									Опис подій		
	Поч. стан	Графічний опис стану	Коефіцієнти масштабування						Y	Назва події	Заверш. процес	Кінц. стан
			P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>				
1	S <sub>10</sub>		1	1	1	1	0	0	1	T <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	S <sub>9</sub>
2			T <sub>2</sub>	P <sub>2</sub>	S <sub>8</sub>							
3			T <sub>3</sub>	P <sub>3</sub>	S <sub>6</sub>							
4			T <sub>4</sub>	P <sub>4</sub>	S <sub>3</sub>							
5	S <sub>9</sub>		0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
6	S <sub>8</sub>		1	0	k <sub>3</sub>	1	1	0	1	T <sub>5</sub>	P <sub>1</sub>	S <sub>7</sub>
7			T <sub>6</sub>	P <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>							
8			T <sub>7</sub>	P <sub>4</sub>	S <sub>2</sub>							
9			T <sub>8</sub>	P <sub>5</sub>	S <sub>10</sub>							
10	S <sub>7</sub>		0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
11	S <sub>6</sub>		1	k <sub>2</sub>	0	1	0	1	1	T <sub>9</sub>	P <sub>1</sub>	S <sub>5</sub>
12			T <sub>10</sub>	P <sub>2</sub>	S <sub>4</sub>							
13			T <sub>11</sub>	P <sub>4</sub>	S <sub>1</sub>							
14			T <sub>12</sub>	P <sub>6</sub>	S <sub>10</sub>							
15	S <sub>5</sub>		0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
16	S <sub>4</sub>		0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
17	S <sub>3</sub>		0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
18	S <sub>2</sub>		0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
19	S <sub>1</sub>		0	0	0	0	0	0	0	—	—	—

**Марковська модель.** Грунтуючись на моделі станів та подій системи, згідно із формалізованими правилами [10] формують розщеплену однорідну марковську модель. Таку модель подають системою рівнянь Колмогорова — Чепмена:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{p}(t) = \mathbf{A}\mathbf{p}(t),$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{p}(t).$$

де  $t$  – час;  $\mathbf{p}(t)$  – вектор, що містить функції ймовірності фаз;  $\mathbf{y}(t)$  – вектор, який містить функції ймовірності причин непрацездатності.

Марковська модель є множиною матриць, які задають інтенсивності переходів між фазами  $\mathbf{A}$ , початкові ймовірності фаз  $\mathbf{p}(0)$ , а також зв'язок  $\mathbf{C}$  функцій ймовірності фаз із характеристиками надійності системи. Для досліджуваної системи марковська модель подана у виразі:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
\vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{T_{11}} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{T_7} & \vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{T_4} & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{T_{10}} & \mathbf{A}_{T_6} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{T_3} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{T_9} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{S_6} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{T_1} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{T_5} & \vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{T_2} & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{S_8} & \mathbf{A}_{T_2} & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{T_1} & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{T_{12}} & \mathbf{A}_{T_8} & \mathbf{A}_{S_{10}} & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{T_1} & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{p}_{S_{10}}(0)
\end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}(0) = \begin{bmatrix}
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
\mathbf{p}_{S_{10}}(0)
\end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix}
\vdots & \vdots & \vdots & \mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{I} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \mathbf{I} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{I} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots
\end{bmatrix}.$$

Компоненти марковської моделі гідравлічної станції формуємо на основі до-поміжних марковських моделей процесів її елементів. Параметри марковських моделей процесів визначаємо згідно із критерієм рівності першого і центрованого другого моментів фактичного розподілу процесу та його допоміжної марковської моделі. Вважаємо, що для процесу  $P_1\{\alpha_1, \beta_1\}$  параметри його допоміжної марковської моделі становлять:  $\{\mathbf{A}_1, \mathbf{p}_1(0), \mathbf{C}_1\}$ , для  $P_2\{\alpha_2, \beta_2\}$  –  $\{\mathbf{A}_2, \mathbf{p}_2(0), \mathbf{C}_2\}$ , для  $P_3\{\alpha_3, \beta_3\}$  –  $\{\mathbf{A}_3, \mathbf{p}_3(0), \mathbf{C}_3\}$ , для  $P_4\{\alpha_4, \beta_4\}$  –  $\{\mathbf{A}_4, \mathbf{p}_4(0), \mathbf{C}_4\}$ , для  $P_5\{\mu\}$  –  $\{\mathbf{A}_5, \mathbf{p}_5(0), \mathbf{C}_5\}$  та для  $P_6\{\mu\}$  –  $\{\mathbf{A}_6, \mathbf{p}_6(0), \mathbf{C}_6\}$ . Відповідно до вказаних параметрів компоненти марковської моделі усєї системи обчислено згідно із поданими нижче формулами, зокрема для працездатного стану  $S_{10}$ :

$$\begin{aligned}
\mathbf{A}_{S_{10}} &= \mathbf{A}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 + \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{A}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 + \\
&+ \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{A}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 + \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{A}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6, \\
\mathbf{p}_{S_{10}}(0) &= \mathbf{p}_1(0) \otimes \mathbf{p}_2(0) \otimes \mathbf{p}_3(0) \otimes \mathbf{p}_4(0) \otimes \mathbf{p}_5(0) \otimes \mathbf{p}_6(0),
\end{aligned}$$

де  $\otimes$  – оператор тензорного множення;  $\mathbf{E}_1$ – $\mathbf{E}_6$  – одиничні матриці, розмірність яких дорівнює розмірності матриць  $\mathbf{A}_1$ – $\mathbf{A}_6$ .

Для працездатного стану  $S_8$ :

$$\begin{aligned}
\mathbf{A}_{S_8} &= \mathbf{A}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 + k_3 \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{A}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 + \\
&+ \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{A}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 + \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{A}_5 \otimes \mathbf{E}_6.
\end{aligned}$$

Для працездатного стану  $S_6$ :

$$\begin{aligned}
\mathbf{A}_{S_6} &= \mathbf{A}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 + k_2 \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{A}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 + \\
&+ \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{A}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 + \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{A}_6.
\end{aligned}$$

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

$$\mathbf{A}_{T_1} = \mathbf{A}_{T_5} = \mathbf{A}_{T_9} = \mathbf{p}_1 \mathbf{C}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6.$$

Для подій  $T_2$  та  $T_{10}$ , спричинених завершенням процесу  $P_2$ :

$$\mathbf{A}_{T_2} = \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{p}_2 \mathbf{C}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6 \otimes \mathbf{E}_7 \otimes \mathbf{E}_8,$$

$$\mathbf{A}_{T_{10}} = k \mathbf{A}_{T_2}.$$

Для подій  $T_3$  та  $T_6$ , спричинених завершенням процесу  $P_3$ :

$$\mathbf{A}_{T_3} = \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{p}_3 \mathbf{C}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6,$$

$$\mathbf{A}_{T_6} = k \mathbf{A}_{T_3}.$$

Для подій T4, T7 та T11 спричинених завершенням процесу P4:

$$\mathbf{A}_{T_4} = \mathbf{A}_{T_7} = \mathbf{A}_{T_{11}} = \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{p}_4 \mathbf{C}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{E}_6.$$

Для події T8, спричиненої завершенням процесу P5:

$$\mathbf{A}_{T_8} = \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{p}_5 \mathbf{C}_5 \otimes \mathbf{E}_6.$$

Для події T12, спричиненої завершенням процесу P6:

$$\mathbf{A}_{T_{12}} = \mathbf{E}_1 \otimes \mathbf{E}_2 \otimes \mathbf{E}_3 \otimes \mathbf{E}_4 \otimes \mathbf{E}_5 \otimes \mathbf{p}_6 \mathbf{C}_6.$$

У матриці  $\mathbf{C}$  одиничний вектор-рядок  $\mathbf{I}$  має розмірність, яка дорівнює добутку розмірностей усіх матриць інтенсивності переходів  $\mathbf{A}_1$ – $\mathbf{A}_6$ . Цю матрицю складено так, щоб три її рядки відповідали ймовірнісним характеристикам причин непрацездатності системи  $C_1$ – $C_3$ . Одержана модель містить 160 рівнянь.

**Ймовірнісні характеристики системи.** Значення параметрів для елементів гідравлічної станції взято такими:  $\alpha_1 = 20\,000$  год.,  $\beta_1 = 1.1$ ;  $\alpha_2 = \alpha_3 = 2000$  год.,  $\beta_2 = \beta_3 = 1.2$ ;  $\alpha_4 = 10\,000$  год.,  $\beta_4 = 1.3$ , інтенсивність відновлення  $\mu = 0.02$  1/год. На основі розщепленої однорідної марковської моделі обчислено ймовірнісні

характеристики причин непрацездатності гідравлічної станції. На рис. 4 подано сімейство кривих ймовірнісних характеристик для різних значень коефіцієнтів  $k_2$  і  $k_3$ .

Оскільки конструктивно гідравлічні насоси однакові, то беремо, що  $k_2 = k_3$ . Коефіцієнти  $k_2$  та  $k_3$  вказують, наскільки зростає інтенсивність зношування гідравлічних насосів 2 і 3 у перевантаженому режимі порівняно із номінальним режимом. Ці коефіцієнти можуть набувати значень у межах від 1 до  $\infty$ . Суцільні криві 1–5 відповідають ймовірностям непрацездатності системи внаслідок відмови гідравлічних насосів, тобто множині станів  $C_2$ . Штрихові криві 6 і 7 – ймовірностям непрацездатності системи внаслідок відмови електричного двигуна  $C_1$ , а штрих-пунктирні криві 8 і 9 – внаслідок відмови запобіжного клапана  $C_3$ . Криві 1, 6 та 8 відповідають  $k_2 = k_3 = 1$ , крива 2 –  $k_2 = k_3 = 2$ , крива 3 –  $k_2 = k_3 = 3$ , крива 4 –  $k_2 = k_3 = 4$ , а криві 5, 7 і 9 –  $k_2 = k_3 = 5$ . Як видно із рис. 4, зі збільшенням коефіцієнтів  $k_2 = k_3$  в досліджуваних межах ймовірнісна характеристика непрацездатності системи внаслідок відмови гідравлічних насосів зростає у діапазоні, обмеженому кривими 1 та 5, а ймовірнісні характеристики непрацездатності системи внаслідок відмови електричного двигуна, а також внаслідок відмови запобіжного клапана, мають тенденцію до незначного спадання у діапазонах, обмежених кривими 6 і 7 та 8 і 9. Дослідження показало, що залежно від значення коефіцієнтів  $k_2 = k_3$  та досліджуваного часового інтервалу відносний внесок непрацездатності системи вна-

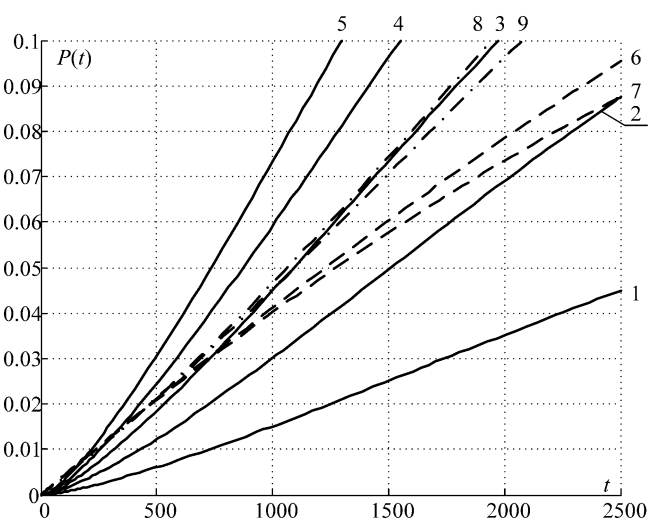


Рис. 4 – Криві ймовірнісних характеристик причин непрацездатності гідравлічної станції

сліджуваного часового інтервалу відносний внесок непрацездатності системи вна-

слідок відмови гідравлічних насосів у загальну непрацездатність системи змінюється. Зокрема, для  $k = \{1; 2\}$  вказана непрацездатність є третьою за пріоритетом. Для  $k = 3$ , а також  $k = \{4; 5\}$  за напрацювання менше 200 год. – другою за пріоритетом. І, для  $k = \{4; 5\}$  і більше за напрацювання понад 1000 год. – першою за пріоритетом.

Одержана марковська модель гідравлічної станції є жорсткою. Така властивість моделі зумовлена розкидом параметрів процесів напрацювання та ремонтування, особливістю методу розщеплення простору станів та впливом коефіцієнтів  $k_2$  та  $k_3$ .

**Висновки.** У статті розроблено математичну модель надійності гідравлічної станції із спареними гідравлічними насосами, призначену для кількісного аналізу причин її непрацездатності. Надійність станції математично описано динамічним деревом відмов, в якому задано логічні умови взаємної зміни навантаження між гідравлічними насосами залежно від їх стану. 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 допомогою цієї моделі проаналізовано, як впливає зміна коефіцієнта збільшення навантаження гідравлічного насоса в аварійному режимі на причини непрацездатності системи. Показано, що збільшення цього коефіцієнта може змінити найімовірнішу причину непрацездатності системи.

Подальші дослідження скеровані на розроблення моделі надійності гідравлічної системи, в якій враховано вплив перерозподілу навантаження, пов'язаний із перемиканням гідравлічного розподільника.

**Список літератури:** 1. *Andrews J. D.* Fast mission reliability prediction for Unmanned Aerial Vehicles [Text] / *J. D. Andrews, J. Pooleb, W. H. Chenb* // Reliability Engineering & System Safety. – 2013. – Vol. 120. – P. 3–9. 2. *Sergio Contini, Vaidas Matuzas.* Analysis of large fault trees based on functional decomposition [Text] / *Sergio Contini, Vaidas Matuzas* // Reliability Engineering & System Safety. – 2011. – Vol. 96, No. 3. – P. 383–390. 3. *Valinčiūsa M.* Integrated assessment of failure probability of the district heating network [Text] / *M. Valinčiūsa, I. Žutautaitė, G. Dundulisa, S. Rimkevičiūsa, R. Janulionisa, R. Bakasb* // Reliability Engineering & System Safety. – 2015. – Vol. 133. – P. 314–322. 4. *Torresa J.* Risk classification and uncertainty propagation for virtual water distribution systems [Text] / *J. Torresa, K. Brumbelowb, S. Guikemac* // Reliability Engineering & System Safety. – 2009. – Vol. 94, No 8. – P. 1259–1273. 5. *Qing Shuang.* Node vulnerability of water distribution networks under cascading failures [Text] / *Qing Shuang, Mingyuan Zhang, Yongbo Yuan* // Reliability Engineering & System Safety. – 2014. – Vol. 124, No 8. – P. 132–141. 6. *Moghaddassa R.* Availability of a general k-out-of-n:G system with non-identical components considering shut-off rules using quasi-birth–death process [Text] / *R. Moghaddassa, M. J. Zuoa, Wenbin Wangb* // Reliability Engineering & System Safety. – 2011. – Vol. 96, No 4. – P. 489–496. 7. *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. 8. *Shcherbovskykh S.* Failure intensity determination for system with standby doubling [Text] / *S. Shcherbovskykh, 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. Shcherbovskykh* // 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.** Andrews, J. D., Pooleb, J., Chenb, W. H. (2013). Fast mission reliability prediction for Unmanned Aerial Vehicles. *Reliability Engineering & System Safety*, 120, 3–9.**2.** Sergio Contini, Vaidas Matuzas (2011). Analysis of large fault trees based on functional decomposition. *Reliability Engineering & System Safety*, 96, 3, 383–390.**3.** Valinčiusa, M., Žutautaitėa, I., Dundulisa, G., Rimkevičiusa, S., Janulionisa, R., Bakasb, R. (2015). Integrated assessment of failure probability of the district heating network. *Reliability Engineering & System Safety*, 133, 314–322.**4.** Torresa, J., Brumbelowb, K., Guikemac, S. (2009). Risk classification and uncertainty propagation for virtual water distribution systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 94, 8, 1259–1273.**5.** Qing Shuang, Mingyuan Zhang, Yongbo Yuan. (2014). Node vulnerability of water distribution networks under cascading failures. *Reliability Engineering & System Safety*, 124, 8, 132–141.**6.** Moghaddassa R., Zuo, M. J., Wenbin Wangb. (2011). Availability of a general k-out-of-n:G system with non-identical components considering shut-off rules using quasi-birth–death process. *Reliability Engineering & System Safety*, 96, 4, 489–496.**7.** 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.**8.** Shcherbovskykh, S., Lozynsky, O., Marushchak, Ya. (2011). Failure intensity determination for system with standby doubling. *Przeglad Elektrotechniczny*, 87, 5, 160–162.**9.** Mandziy, B., Lozynsky, O., Shcherbovskykh, S. (2013). Mathematical model for failure cause analysis of electrical systems with load-sharing redundancy of component. *Przeglad Elektrotechniczny*, 89, 11, 244–247.**10.** Shcherbovskykh, S. (2012). Математичні моделі та методи для визначення характеристик надійності багатотермінальних систем із урахуванням перерозподілу навантаження: монографія, Lviv, Vidavnitstvo Lvivska Politehnika, 296.

Поступила (received) 28.04.2015

УДК 665.64

**И. Л. ЛЕВЧУК**, канд. техн. наук, доц., УГХТУ, Днепропетровск

## СТАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА

На основе анализа входных и выходных координат выполнена постановка задачи статической оптимизации процесса каталитического риформинга, предложен способ решения этой задачи на основе метода нелинейной оптимизации Хука-Дживса. Проведено исследование оптимальных режимов процесса, предложен способ управления, обеспечивающий увеличение выхода катализата в среднем на 3-5 %.

**Ключевые слова:** нефтепереработка, каталитический риформинг, катализат, статическая оптимизация, базовые режимы, способ управления.

**Введение.** Каталитический риформинг, один из основных процессов современной нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Он широко используется для получения высокооктанового компонента современных бензинов, а также для производства ароматических углеводородов, главным образом бензола, толуола и ксилолов - сырья нефтехимии. Важную роль каталитический риформинг играет и в обеспечении водородом процессов гидроочистки нефтяных продуктов [1].

© И. Л. ЛЕВЧУК, 2015