

УДК 519.718.2

Т. О. Стефанович, канд. техн. наук,**С. В. Щербовських**, д-р. техн. наук, професор

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПРИЧИН НЕПРАЦЕЗДАТНОСТІ НАСОСНОГО ВУЗЛА ІЗ ПОЛЕГШЕНИМ КОВЗНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ

Запропоновано математичну модель надійності насосного вузла із полегшеним ковзним резервуванням. Така модель надійності адекватно враховує вплив коефіцієнта навантаження для розподільника, який вмикає резервний насос, на ймовірнісні характеристики причин непрацездатності насосного вузла. Для визначення характеристик надійності застосовано динамічне дерево відмов та марковську модель.

Ключові слова: *модель надійності, ковзне резервування, дерево відмов, марковська модель, причина непрацездатності.*

Вступ. На підприємствах харчової, хімічної та переробної промисловості використовують насосні вузли, призначені для перекачування робочого середовища. Для підвищення надійності насосних вузлів застосовують ковзне резервування. В цьому випадку група основних насосів резервується одним чи декількома насосами, кожний з яких може замінити будь-який із насосів основної групи у випадку його відмови. Для вмикання резервного насоса замість непрацездатного насоса з основної групи в системі встановлений гідравлічний розподільник. За незатребуваного резервного насоса гідравлічний розподільник перебуває у полегшеному режимі. Після вмикання ним насоса він переходить у навантажений режим роботи. У результаті постає проблема формування математичної моделі надійності, яка адекватно враховуватиме вплив зміни навантаження розподільника на ймовірнісні характеристики надійності, а саме на причини непрацездатності такої системи

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для побудови моделей надійності насосних вузлів виділяємо такі 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 працях [3, 4] 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 співмірна із зна-

ченнями 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.

Для розв'язання поставленої проблеми використано підхід, який ґрунтується на поєднанні динамічних дерев відмов та марковських моделей надійності. Для послаблення обмеження експоненціальним розподілом застосовано розщеплення простору станів на основі тензорного аналізу [7–9], яке забезпечило врахування довільних розподілів і «запам'ятовування» передісторії напрацювання елементів системи за навантаженням.

Завдання дослідження:

- математично описано надійність системи на основі динамічного дерева відмов;
- побудовано модель станів та подій і розщеплену однорідну марковську модель системи;
- визначено ймовірнісні характеристики причин непрацездатності системи.

Опис системи та її динамічне дерево відмов. Насосний вузол складається із основної і резервної груп елементів (рис. 1). До основної групи входять насоси 1 та 2, які з'єднані між собою паралельно. До резервної групи входять розподільник 3 та насос 4, які сполучені між собою послідовно. Подача усіх трьох насосів 1, 2 та 4 однакова і становить для кожного із них половину від сумарної подачі насосного вузла.

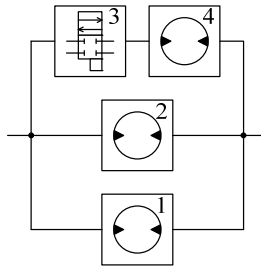


Рис. 1. Функціональна схема насосного вузла

Система функціонує таким чином. Насоси 1 і 2 перекачують робоче середовище, поділяючи сумарну подачу порівну, а розподільник 3 і насос 4 у цей час перебувають у резерві. У такому режимі навантаження насосів 1 і 2 номінальне, розподільника 3 — полегшене, а насоса 4 — відсутнє. Втрата працездатності системи може розвиватись двома шляхами. Перший шлях полягає у тому, що настає непрацездатність одного із насосів основної групи, внаслідок якої розподі-

льник вмикає резервний насос. У такому режимі навантаження працездатного насоса із основної групи, а також навантаження обох елементів резервної групи номінальне. Другий шлях полягає у тому, що настає непрацездатність розподільника, яка унеможливує подальше вмикання резервного насоса. У такому режимі навантаження обох насосів із основної групи залишається номінальним, а резервного насоса — відсутнє. Якщо у першому чи другому випадку до завершення ремонту непрацездатного елемента настає відмова ще одного елемента, то це викликає відмову усієї системи.

Формалізуємо надійність системи динамічним деревом відмов, яке подано на рис. 2а, а відповідна йому структурна схема надійності — на рис. 2б. 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.

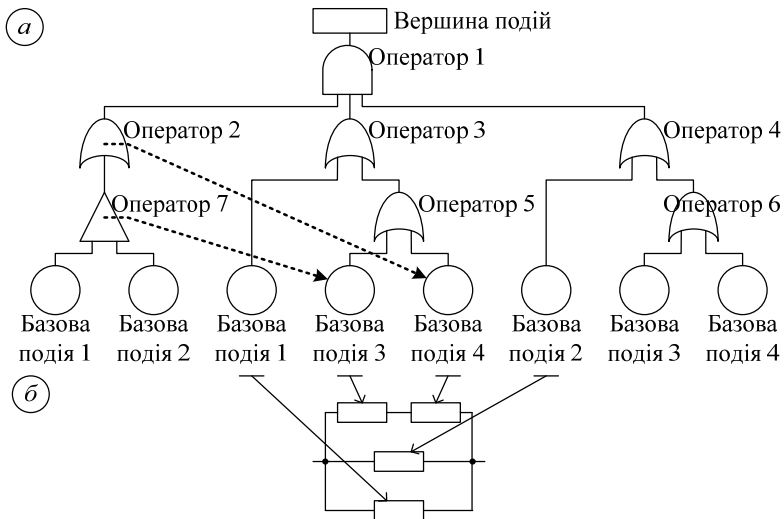


Рис. 2. Динамічне дерево відмов (а)

та структурна схема надійності (б) насосного вузла

Непрацездатність системи позначено блоком «Вершина подій». Вважаємо, що така подія є катастрофічною, тобто поки вона не відбулась, ремонтування елементів системи можна виконати стільки разів, скільки у цьому виникає потреба, а якщо вона наступила, то подальше ремонтування не розглядаємо. Відновлений елемент за експлуатаційними характеристиками вважаємо аналогічним новому, а інші елементи системи такими, що мають попереднє напрацювання. Непрацездатність системи настає, якщо відбулось три події, що описує блок «Опе-

ратор 1», тип якого задано логічною операцією І. Зауважимо, що ці події є сумісними, і, якщо настала одна із них, то це спрощує настання двох інших. Перша подія настає внаслідок відмови хоча б одного насоса 1 чи 2 із основної групи, що описує блок «Оператор 2», тип якого задано логічною операцією АБО. Непрацездатність цих насосів описують блоки «Базова подія 1» та «Базова подія 2», а напрацювання їх до відмови вважаємо розподіленим за законом Вейбулла із параметрами α_1 і β_1 та α_2 і β_2 . Друга подія настає внаслідок відмови насоса 1 або групи резервних елементів, що описує блок «Оператор 3», тип якого задано логічною операцією АБО. Третя подія настає внаслідок відмови насоса 2 або групи резервних елементів, що описує блок «Оператор 4», тип якого задано логічною операцією АБО. Непрацездатність групи резервних елементів відбувається у разі відмови розподільника 3 або резервного насоса 4, що описують для другої події блок «Оператор 5», а для третьої блок «Оператор 6», тип яких задано логічною операцією АБО. Непрацездатність елементів резервної групи описують блоки «Базова подія 3» та «Базова подія 4», а напрацювання їх до відмови вважаємо розподіленим за законом Вейбулла із параметрами α_3 і β_3 та α_4 і β_4 . Тривалість ремонтування елементів системи вважаємо розподіленою експоненціально із параметром μ .

У системі відбувається два динамічні процеси, які полягають у зміні навантаження елементів резервної групи залежно від стану елементів основної групи. Для опису цих процесів введемо у структуру динамічного дерева відмов блок «Оператор 7», який є повторювачем логічного сигналу, і задамо у ньому, а також у блоці «Оператор 2» умови зміни навантаження. Якщо на вхід блоку «Оператор 7» подається логічний сигнал ХИБНО, тобто група основних елементів працездатна, то інтенсивність процесу напрацювання розподільвача 3, заданого блоком «Базова подія 3», вважаємо нижчою від номінальної в k разів. З іншого боку, якщо на вхід блоку «Оператор 2» поступає логічний сигнал ХИБНО, що так само означає працездатність групи основних елементів, то інтенсивність процесу напрацювання резервного насоса 4, заданого блоком «Базова подія 4», вважаємо рівною нулю.

Модель станів та подій. На основі поданого вище динамічного дерева відмов системи 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 насоса 1 позначено як P_1 , для насоса 2 — P_2 , для розподільника 3 — P_3 та для резервного насоса 4 — P_4 .

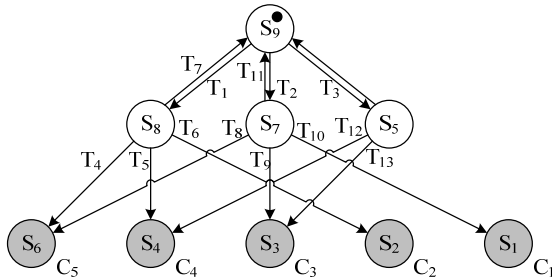


Рис. 3. Граф станів та переходів насосного вузла

Таблиця 1

Параметри моделі станів та подій насосного вузла

Опис станів						Опис подій										
Поч. стан	Графічний опис стану	Коефіцієнти масштабування				у	Назва події	Заверш. процес	Кін. стан.							
		P ₁ /P ₅	P ₂ /P ₆	P ₃ /P ₇	P ₄											
S ₉		1 / 0	1 / 0	k / 0	0	1	T ₁	P ₁	S ₈							
							T ₂	P ₂	S ₇							
							T ₃	P ₃	S ₅							
S ₈		0 / 1	1 / 0	1 / 0	1	1	T ₄	P ₂	S ₆							
							T ₅	P ₃	S ₄							
							T ₆	P ₄	S ₂							
							T ₇	P ₅	S ₉							
S ₇		1 / 0	0 / 1	1 / 0	1	1	T ₈	P ₁	S ₆							
							T ₉	P ₃	S ₃							
							T ₁₀	P ₄	S ₁							
S ₆		0 / 0	0 / 0	0 / 0	0	—	—	—	—							
							S ₅		1 / 0	1 / 0	0 / 1	0	1	T ₁₂	P ₁	S ₄
														T ₁₃	P ₂	S ₃
S ₄		0 / 0	0 / 0	0 / 0	0	0	—	—	—							
S ₃		0 / 0	0 / 0	0 / 0	0	0	—	—	—							
S ₂		0 / 0	0 / 0	0 / 0	0	0	—	—	—							
S ₁		0 / 0	0 / 0	0 / 0	0	0	—	—	—							

Процеси ремонтування для насосів 1 та 2 позначено як P₅ та P₆, а для розподільника 3 — P₇. Відмова резервного насоса 4 призводить одразу до катастрофічної відмови, тому процес його ремонтування не зада-

емо. На рис. 3 працездатні стани системи позначені колом, яке зафарбоване білим, а непрацездатні стани — колом, яке зафарбоване сірим. Система перебуває у дев'яти станах, із яких чотири відповідають працездатності — S_5, S_7-S_9 . Для даної системи кожній причині непрацездатності системи відповідає один непрацездатний стан. Зокрема, причині C_1 , яка полягає у непрацездатності насосів 2 і 4, відповідає стан S_1 ; причині C_2 , яка полягає у непрацездатності насосів 1 і 4, — S_2 ; причині C_3 , яка полягає у непрацездатності насоса 2 і розподільника 3, — S_3 ; причині C_4 , яка полягає у непрацездатності насоса 1 і розподільника 3, — S_4 та причині C_5 , яка полягає у непрацездатності насосів 1 і 2, — S_6 . У системі відбувається чотирнадцять подій, із яких вісім спричиняють катастрофічну відмову — $T_4-T_6, T_8-T_{10}, T_{12}$ та T_{13} . Параметрами станів є значення коефіцієнтів масштабування для процесів P_1-P_7 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.

Марковська модель. Грунтуючись на моделі станів та подій системи, згідно із формалізованими правилами [10] формуємо розщеплену однорідну марковську модель. Така модель є множиною матриць, які задають інтенсивності переходів між фазами A , початкові ймовірності фаз $p(0)$, а також зв'язок C функцій ймовірності фаз із характеристиками надійності системи. Марковську модель подають системою рівнянь Колмогорова-Чепмена:

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

$$y(t) = C p(t).$$

де t — час; $p(t)$ — вектор, що містить функції ймовірності фаз; $y(t)$ — вектор, який містить функції ймовірності причин непрацездатності.

Для досліджуваної системи марковська модель є такою:

$$A = \begin{bmatrix} & & & & A_{T_{10}} & & & & \\ & & & & & & & A_{T_6} & \\ & & & & & & & & \\ & & A_{T_{13}} & & A_{T_9} & & & & \\ & & A_{T_{12}} & & & & & A_{T_5} & \\ & & A_{S_5} & & & & & & A_{T_3} \\ & & & & A_{T_8} & & A_{T_4} & & \\ & & & & A_{S_7} & & & & A_{T_2} \\ & & & & & & A_{S_8} & & A_{T_1} \\ & & & & & & & & \\ & & & A_{T_{14}} & A_{T_{11}} & & A_{T_7} & & A_{S_9} \end{bmatrix}, p(0) = \begin{bmatrix} \text{-----} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \\ p_{S_9}(0) \end{bmatrix},$$

Для подій T_1, T_8 та T_{12} , спричинених завершенням процесу P_1 :

$$A_{T_1} = A_{T_8} = A_{T_{12}} = p_1 C_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6 \otimes E_7.$$

Для подій T_2, T_4 та T_{13} , спричинених завершенням процесу P_2 :

$$A_{T_2} = A_{T_4} = A_{T_{13}} = E_1 \otimes p_2 C_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6 \otimes E_7.$$

Для подій T_3, T_5 та T_9 , спричинених завершенням процесу P_3 :

$$A_{T_5} = A_{T_9} = E_1 \otimes E_2 \otimes p_3 C_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6 \otimes E_7,$$

$$A_{T_3} = k A_{T_5}.$$

Для подій T_6 та T_{10} , спричинених завершенням процесу P_4 :

$$A_{T_6} = A_{T_{10}} = E_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes p_4 C_4 \otimes E_5 \otimes E_6 \otimes E_7.$$

Для події T_7 , спричиненої завершенням процесу P_5 :

$$A_{T_7} = E_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes p_5 C_5 \otimes E_6 \otimes E_7.$$

Для події T_{11} , спричиненої завершенням процесу P_6 :

$$A_{T_{11}} = E_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes p_6 C_6 \otimes E_7.$$

Для події T_{14} , спричиненої завершенням процесу P_7 :

$$A_{T_{14}} = E_1 \otimes E_2 \otimes E_3 \otimes E_4 \otimes E_5 \otimes E_6 \otimes p_7 C_7.$$

У матриці C одиничний вектор-рядок I має розмірність, яка дорівнює добутку розмірностей усіх матриць інтенсивності переходів A_1 – A_7 . Цю матрицю складено так, щоб п'ять її рядки відповідали ймовірнісним характеристикам причин непрацездатності системи C_1 – C_5 . Одержана модель містить 144 рівняння.

Ймовірнісні характеристики системи. Значення параметрів для елементів системи взято такими: $\alpha_1 = \dots = \alpha_4 = 10\,000$ год., $\beta_1 = \beta_2 = \beta_4 = 1.2$ та $\beta_3 = 1.1$, інтенсивність відновлення $\mu = 0.02$ 1/год. На основі розщепленої однорідної марковської моделі обчислено ймовірнісні характеристики причин непрацездатності системи. На рис. 4 подано сімейство кривих ймовірнісних характеристик для різних значень коефіцієнта навантаження k . Цей коефіцієнт вказує, наскільки зменшується інтенсивність напруцювання розподільника у режимі очікування порівняно із номінальним режимом. Коефіцієнт може набувати значення у межах від 0 до 1. Значення 0 означає, що у режимі очікування навантаження розподільника відсутнє, а значення 1 — що у режимі очікування його навантаження є номінальним. Штрихові криві 1 і 2 відповідають ймовірності непрацездатності системи внаслідок причин C_1 , за якої непрацездатні насоси 2 і 4, та C_2 , за якої непрацездатні насоси 1 і 4. Суцільні криві 3–8 — ймовірності непрацездатності системи внаслідок причини C_3 , за якої непрацездатні насос 2 і розподільвач 3, та C_4 , за якої непрацездатні насос 1 і розподільвач 3.

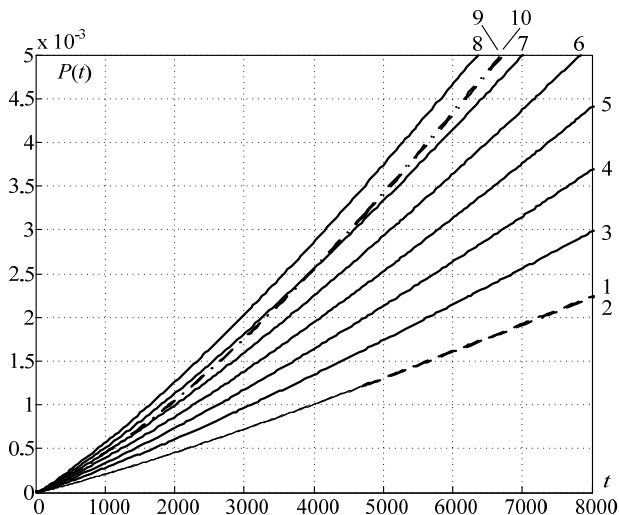


Рис. 4. Криві ймовірнісних характеристик причин непрацездатності насосного вузла

Штрих-пунктирні криві 9 і 10 — ймовірності непрацездатності системи внаслідок причини C_5 , за якої непрацездатні насоси 1 та 2. Криві 1, 3 і 9 відповідають значенню $k = 0$; крива 4 — $k = 0.2$; крива 5 — $k = 0.4$; крива 6 — $k = 0.6$; крива 9 — $k = 0.8$; а криві 2, 8 та 10 — $k = 1$. Як видно із рис. 4 зі збільшенням коефіцієнта k у досліджуваній області ймовірнісні характеристики непрацездатності системи внаслідок причин C_1 , C_2 та C_5 незначно спадають у діапазонах, обмежених кривими 1 і 2 та кривими 9 і 10. Ймовірнісні характеристики непрацездатності системи внаслідок причини C_3 і C_4 різко зростають у діапазоні, обмеженому кривими 3 і 8. Це означає, що залежно від значення коефіцієнта k та досліджуваного часового інтервалу відносний внесок причин непрацездатності змінюється. Зокрема, для напрацювання 8 000 год та для $k = \{0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$ домінуючою причиною непрацездатності є C_5 , а для $k = 1.0$ на перше місце виходять C_3 та C_4 . Для напрацювання 4 000 год. описана вище тенденція зберігається, окрім значення $k = 0.8$, за якого C_3 та C_4 домінують над C_5 .

Висновки. Розроблено математичну модель надійності насосного вузла із полегшеним ковзним резервуванням. Одержана модель призначена для кількісного аналізу причин непрацездатності такої системи. Надійність насосного вузла математично описано динамічним деревом відмов, в якому задано логічні умови зміни навантаження розподільника залежно від стану насосів основної групи. Ймовірнісні характеристики насосного вузла визначено за марковською моделлю, в якій на основі тензорних виразів розщеплення простору ста-

нів, враховано вплив перерозподілу навантаження між елементами системи, тривалість напрацювання до відмови яких розподілено за законом Вейбулла. За допомогою такої моделі проаналізовано, як впливає зміна коефіцієнта навантаження розподільника на причини непрацездатності системи. Кількісно показано, що зі збільшенням коефіцієнта навантаження розподільника у режимі очікування непрацездатність системи внаслідок відмови одного із насосів основної групи та розподільника із другорядної причини стає домінуючою.

Подальші дослідження скеровані на розроблення моделі надійності насосного вузла із перехресним перерозподілом навантаження між елементами такої системи.

Список використаних джерел:

1. Vega M. Algorithm to evaluate substation reliability with cut and path sets / M. Vega, H. G. Sarmiento // *Industry Applications, IEEE Transactions on.* — 2008. — Vol. 44, № 6. — P. 1851–1858.
2. Wei-Chang Yeh. A new algorithm for generating minimal cut sets in k-out-of-n networks / Wei-Chang Yeh // *Reliability Engineering & System Safety.* — 2006. — Vol. 91, № 1. — P. 36–43.
3. 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 / T. P. Khanh Nguyen, Julie Beugina, Juliette Marais // *Reliability Engineering & System Safety.* — 2015. — Vol. 133. — P. 300–313.
4. Zhu P. A stochastic approach for the analysis of dynamic fault trees with spare gates under probabilistic common cause failures / P. Zhu, J. Han, L. Liu, F. Lombardi // *Reliability, IEEE Transactions on.* — Vol. 64, № 3. — P. 878–892.
5. Manno G. 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. — Vol. 121, № 1. — P. 250–262.
6. Daniele Codetta-Raiteri. Integrating several formalisms in order to increase Fault Trees' modeling power / Daniele Codetta-Raiteri // *Reliability Engineering & System Safety.* — 2011. — Vol. 96, № 5. — P. 534–544.
7. Shcherbovskiykh S. Failure intensity determination for system with standby doubling / S. Shcherbovskiykh, O. Lozynsky, Ya. Marushchak // *Przeglad Elektrotechniczny.* — 2011. — Vol. 87, № 5. — P. 160–162.
8. Mandziy B. Mathematical model for failure cause analysis of electrical systems with load-sharing redundancy of component / B. Mandziy, O. Lozynsky, S. Shcherbovskiykh // *Przeglad Elektrotechniczny.* — 2013. — Vol. 89, № 11. — P. 244–247.
9. Stefanovych T. The reliability model for failure cause analysis of pressure vessel protective fittings with taking into account load-sharing effect between valves / T. Stefanovych, S. Shcherbovskiykh, P. Drozdziel // *Diagnostyka.* — 2015. — Vol. 16, № 4. — P. 17–24.
10. Щербовських С. В. Математичні моделі та методи для визначення характеристик надійності багатотермінальних систем із урахуванням перерозподілу навантаження: монографія / С. В. Щербовських. — Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2012. — 296 с.

The mathematical reliability model for pump unit with reduced sliding redundancy is suggested. This reliability model adequately takes into account impact of load-sharing coefficient of directional control valve that reserve pump turn on failure cause probability characteristics of pump unit. For reliability characteristics determination dynamic fault tree and Markov model are used.

Key words: *reliability model, sliding redundancy, fault tree, Markov model, failure cause.*

Отримано: 12.04.2016

УДК 004.89+004.932

Р. О. Ткаченко, д-р техн. наук, професор,

І. В. Ізонін, канд. техн. наук,

Д. А. Батюк, аспірант,

Р. В. Сидоренко,

В. І. Прострельчук

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЗАСОБАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У роботі розроблено метод передискретизації зображень з цільовим коефіцієнтом зменшення засобами машинного навчання. Подано алгоритмічну реалізацію процедури синтезу матриці вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків, що лежить в основі процесу передискретизації. Підбрано оптимальні параметри нейронних мереж машини геометричних перетворень для роботи в режимі навчання при розв'язанні поставленої задачі. Наведено числові та графічні результати передискретизації за розробленим методом на різних зображеннях.

Ключові слова: *зображення, передискретизація, машинне навчання.*

Вступ. Топологічні підходи в задачах передискретизації зображень, зокрема з цільовим коефіцієнтом зменшення, передбачають використання різноманітних скінченних покриттів відкритими множинами. Це дає можливість будувати різноманітні вектори ознак, що характеризуватимуть елемент визначеної на зображенні топології. Існування в просторі ознак значної кількості векторів, іноді також великої розмірності, є вагомим аргументом для використання чи розробки методів машинного навчання в задачах обробки цифрових зображень.

Аналіз попередніх досліджень і постановка задачі. У роботах [1, 2] розв'язано задачу передискретизації цифрових зображень засобами машинного навчання, зокрема з використанням нейроподібних структур