

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

Серія: Інформатика та моделювання

№ 2 (4) 2020

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ "ХПІ", 2020

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2020. – № 2 (4). – 145 с.

Державне видання

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України

КВ № 23774-13614Р від 14 лютого 2019 року

Збірник виходить українською, російською та англійською мовами.

Віснику Національного технічного університету "ХПІ" присвоєно категорію В та внесено до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого наказом Міністерства освіти і науки України № 409 (додаток 1) від 17.03.2020 р.

Серія "Інформатика та моделювання" Вісника НТУ "ХПІ" включена у наукометричні бази Copernicus (Польща), Elibrary (РІНЦ), DOAJ (Швеція), Google Scholar і базу даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Головний редактор

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ "ХПІ", Україна

Заст. головного редактора

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Україна

Секретар

Горбунов К. О., доц., НТУ "ХПІ", Україна

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Дмитрієнко В. Д., д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: Леонов С. Ю., д-р техн. наук, проф.

Члени редколегії:

О.П. Арсенєва, д-р техн. наук, проф.;

Є.Г. Жилияков, д-р техн. наук, проф.;

О.Ю. Заковоротний, д-р техн. наук, проф.;

М.І. Корсунов, д-р техн. наук, проф.;

Г.А. Кучук, д-р техн. наук, проф.;

О.С. Логунова, д-р техн. наук, проф.;

Р.П. Мигущенко, д-р техн. наук, проф.;

А.І. Поворознюк, д-р техн. наук, проф.;

Г.А. Самігуліна, д-р техн. наук, проф. (Казахстан);

О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.;

Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;

Г.Є. Філатова, д-р техн. наук, проф.;

А.Г. Трифонов, д-р техн. наук, проф. (Белорусь);

Х. Гамзаєв, д-р техн. наук, проф. (Азербайджан);

Б.А. Худаяров, д-р техн. наук, проф. (Узбекистан);

I. Zanevsky, PhD, prof. (Polska);

D. Sakara, PhD, prof. (Switzerland);

Jiri Jaromir Klemes, Dr., Prof (Czech Republic);

Issa Shehabat, Dr., Assistant Professor (Jordan);

David J. Kukulka, PhD (USA);

Badur Tchunashvili, Dr., Prof (Georgia);

Javad Khamisabadi, Dr. (Iran);

М.К. Усаров, д-р фіз.-мат. наук, с.н.с., (Узбекистан).

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"

Протокол № 7 від 29.12.2020 р.

ISSN 2079-0031 (Print)

ISSN 2411-0558 (Online)

© Національний технічний університет "ХПІ", 2020

Розміщення Вісника НТУ "ХПІ"
серія "Інформатика та моделювання"

в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах

1. Serial registries: ISSN, Ulrich's Periodical Directory (USA).

2. Abstracting systems: Copernicus (Poland), eLibrary (Russia), CiteFactor, SIS (Scientific Indexing Services), Open Academic Journals Index (Russia), UIF (Universal Impact Factor), Directory of Research Journals Indexing (India).

3. Web-based search systems: Google Scholar, Academic Index.

4. Electronic Libraries: Cyberleninka (Russia), Bielefeld Academic Search Engine (Germany), Open Journal Systems (Ukraine), Національна бібліотека ім. Вернадського (Ukraine), Науково-технічна бібліотека НТУ "ХПІ" (Ukraine), Text Archive (Russia).

5. Journal databases: Directory of open access journals (Sweden), OCLC WorldCat (USA), Research Bible (Japan), Genamics Journal Seek (USA), SHERPA/ReMeO, Academic Database Assessment Tool.

6. University Libraries: **USA:** Walden University, Beardsley Library Journals, University at Albany, University of Texas, WRLC Catalogs, University Oregon, Monterey Bay Library, University of Kentucky, University of Georgia, Indiana University, Harvard Library, New York University, Northwestern University, San Jose State University, Library & Technology Services, Mercyhurst College Library System, Poudre River Public Library District, Virtual Science Library, Journal index, Jean and Alexander Heard Library. **UK:** Birmingham Public Library, British Library, Social Services Knowledge Scotland, Linking Service, University of Strathclyde Glasgow, SUPrimo Library, University of Glasgow, Royal Holloway University of London, University of Cambridge, University of Essex, University of Nottingham, One Search, UCL Library Services. **Canada:** University of New Brunswick, Trinity Western University, University of Saskatchewan, University of Ottawa, University of Regina, University of Windsor, Laurentian University. **Australia:** Latrobe University Library, The Grove Library, State Library, SL On Search, Griffith University, UniSA. **Sweden:** IBRIS – Nationally bibliotheca system, Hogskolan Dalarna, Sodertorns hogskola, Stockholms University Library, Chalmers Bibliotheca. **Netherlands:** Quality Open Access Market, University of Leiden. **Mexico:** University Mexico, CCG-IBT Bibliotheca. **Other countries:** Universia (Spain), Babord+ (France), SLU (Sweden), Cerge EL (Czech Republic), BON (Portugal), AUT Library (New Zealand), Polska Bibliografia Naukowa (Poland), State National Technical Library (Ukraine), Scientific Library named by Govorov (Russia, St. Petersburg), Universiteits bibliotheek Gent (Belgium), E-Resources Subject Access (China).

Електронна адреса сайту Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" www.pim.net.ua

УДК 519.876.5:621.313.333

DOI: 10.20998/2411-0558.2020.01.07

Т. В. АЛТУХОВА, ас., ДонНТУ, Покровськ,

О. А. ДМИТРИЄВА, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ДонНТУ,

Покровськ

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ НА ОСНОВІ МЕРЕЖ ПЕТРІ

Розглянуто можливість використання мереж Петрі при виконанні контролю технічного стану та діагностики електродвигунів. Розроблено математичну модель процесу діагностики, засновану на використанні нечітких часових мереж Петрі. Контроль технічного стану електродвигуна в моделі здійснювався на основі кластерного аналізу. Опис процесу діагностики здійснювався з впровадженням множин подій, станів, переходів, вхідних і вихідних функцій, маркерів, параметрів часових затримок. Іл.: 3. Табл.: 1. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: мережа Петрі; технічний стан; процес діагностики; електродвигун; математична модель.

Вступ. Сучасний розвиток технічного прогресу в Україні та у всьому світі та експлуатація на промислових підприємствах застарілого обладнання разом з новітніми технологіями зводиться до того, що є необхідність в розгляданні актуального питання підвищення надійності та ефективності роботи електромеханічного обладнання (ЕМО), а це, в свою чергу, залежить від зносу при його експлуатації. Виникнення дефектів в процесі роботи будь-якого устаткування може виникати в різні моменти життєвого циклу, а саме при виготовленні, монтажу, налагодженні, експлуатації, випробуваннях, ремонті та мати різноманітні наслідки [1].

Аналіз стану питання. На даний час промислові підприємства використовують неефективну систему планово-попереджувальних ремонтів (ППР) та обслуговування по напрацюванню електромеханічним обладнанням певного числа годин, яка має досить вагомні недоліки: по-перше, ремонти ЕМО виконуються тільки по вже сформованим на підприємствах графікам або після розрахунку напрацьованих годин; по-друге, високу трудомісткість розрахунків трудовитрат та обліку параметрів; по-третє, складність оперативного коректування запланованих ремонтів. Це все, в свою чергу, призводить до таких небажаних наслідків, як можливий ризик виникнення непланових ремонтів ЕМО та значних втрат на підприємствах, так як в результаті виходу з ладу ЕМО виробництво необхідно зупиняти на тривалий час, в той же час проведення ППР займає досить багато часу. В свою чергу

© Т.В. Алтухова, О.А. Дмитрієва, 2020

обслуговування на робочому електромеханічному обладнанні також приводить до підвищення експлуатаційних витрат та виробничого часу [1]. Виходячи з цього, можна стверджувати, що використання існуючої системи ППР обладнання є досить неефективним, тому, враховуючи це, є необхідність впроваджувати обслуговування та діагностику ЕМО тільки за фактичним станом, так як є, по-перше, можливість оптимізувати матеріально-технічні витрати; по-друге, зменшити втрати, що обумовлені простоями та необхідністю проведення позапланових ремонтів устаткування на підприємствах; по-третє, забезпечити попередження виникнення аварійних ситуацій, що призводять до тривалих ремонтів або повного виходу з ладу [1, 2].

На більшості промислових підприємств нашої країни, таких як, наприклад, вугільні підприємства, електромеханічне обладнання знаходиться в експлуатації понад 10-15 років, незважаючи на те, що сучасні електродвигуни гірничих машин відрізняються достатньо високою надійністю в експлуатації, проте негативний вплив різноманітних агресивних факторів дуже значний. Для успішного діагностування необхідно враховувати різні характерні чинники та ознаки, що призводять до відмови електродвигунів (ЕД), а також наслідки виходу з ладу обладнання. Окрім цього всі існуючі методи діагностики та моніторингу технічного стану сучасних різноманітних систем базуються на математичних моделях, які є потужним інструментом при розв'язанні інженерних проблем та, в свою чергу, дозволяють зрозуміти поведінку тієї чи іншої системи при виявленні її несправностей та дефектів [2, 3].

Аналіз основних досягнень і літератури. Математичні моделі, які останнім часом використовуються в сучасній діагностиці технічного стану електромеханічного обладнання, базуються на штучних нейронних мережах (ШНМ) [4, 5], нечіткій логіці (НЛ) [6] та нейро-нечітких мережах (ННМ) [7, 8]. Останнім часом з'являються математичні моделі діагностики з використанням мереж Петрі [9, 10], їх застосування в медичних інформаційних системах свідчить про високу точність прогнозів та рекомендацій. Так в [9] представлено математичну модель на основі мереж Петрі для дослідження дискретних фізіологічних систем, які відстежують динаміку роботи серця людини. В [10] на базі мереж Петрі розроблено математичну модель процесу діагностики гострого панкреатиту, що дозволяє відстежувати поточний стан пацієнта.

Використання мереж Петрі в технічній діагностиці дозволило авторам [11] запропонувати математичну модель для дослідження ефективності функціонування інформаційної системи з використанням математичного апарату розширених мереж Петрі. В роботі [12] виконано

розробку моделі на базі мереж Петрі, яка дозволяє виконувати аналіз передачі та отримання даних для виготовлення деталей в галузі машинобудування мережею Інтернет, з імітацією відмов роботи програми при передачі даних. Автори [12, 13] застосували мережу Петрі для розробки динамічної моделі протоколу взаємодії TSL з урахуванням його особливостей в інформаційних системах, що дозволило виявити вузькі місця протоколу, які приводять до затримок в обслуговуванні. Розглянуто модель процесу формування та оцінки реалізації інформаційно-керуючих систем мехатронних комплексів. Для моделювання також використовували мережі Петрі, але нечіткі часові, що дозволило визначати помилки та слабкі місця в даному процесі, причому з мінімальними втратами на їх виправлення. Авторами роботи [13] запропонована математична модель збалансованої системи показників складних систем на основі розфарбованих мереж Петрі, що включає як "горизонтальну", так і "вертикальну" структури для забезпечення моделювання динаміки змін показників.

Таким чином, проведений аналіз застосування в математичних моделях діагностики та прогнозування мереж Петрі, а також високі показники точності отриманих показників в моделях, що побудовано з застосуванням таких мереж, порівняння простота опису та аналізу різноманітних систем, в тому числі систем електрообладнання, визначили спрямованість і актуальність даної роботи.

Мета статті полягає в розробці і обґрунтуванні математичної моделі з використанням мереж Петрі, яку орієнтовано на діагностику та контроль технічного стану електродвигунів для підвищення їх надійності та ефективності функціонування, передбачення незапланованих ремонтів і аварійних ситуацій.

Розробка і обґрунтування математичної моделі діагностики технічного стану електродвигунів. Моделювання процесу діагностики за допомогою мереж Петрі здійснюється з використанням рівня подій. В даному випадку переходи відображують події, а позиції, відповідно, вказують на відповідні стани до та після виконання відповідних дій в системі. Проведення аналізу результатів моделювання дозволить визначити стан системи діагностики електродвигунів при будь-яких алгоритмах керування та процедурах, що виконуються. Для опису процесу діагностики використовується загальний опис нечітких часових мереж Петрі [14]:

$$PN\langle P, T, I, Q, M, Z, S \rangle, \quad (1)$$

де $P = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – кінцева множина подій;

$T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_j\}$ – кінцева множина переходів;

$I(t) = p$ – вхідна функція, що визначає кратність вхідних дуг переходів;

$Q(t) = p$ – вихідна функція, що визначає кратність вихідних дуг переходів;

$M = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_i\}$ – маркування, причому $m_i = m(p_i)$, $i = \overline{1, \dots, n}$;

$Z = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_i\}$ – параметри часової затримки маркерів у позиціях мережі;

$S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_i\}$ – параметри часового спрацювання маркерів у позиціях мережі.

На рис. 1 зображена мережа Петрі процесу діагностики електродвигунів гірничого обладнання.

Моделювання за допомогою мереж Петрі повинно задовольняти наступним вимогам [15]:

$$|I(p_i)| = |t_j| p_i \in Q(t_j) = 1, \quad (2)$$

$$|Q(p_i)| = |t_j| p_i \in I(t_j) = 1. \quad (3)$$

Причому виконання переходу $t_j \in T$ виконується за наступною умовою [15]:

$$t_j : m(p_i) \geq \#(p_i, I(t_j)) \quad (4)$$

тоді при виконанні умови (4) нове маркування $m'(p_i)$ буде визначатися наступним чином:

$$m'(p_i) = m(p_i) - \#(p_i, I(t_j)) + \#(p_i, Q(t_j)), \quad (5)$$

Якщо умова (4) не виконується, нове маркування $m''(p_i)$ буде визначатися як

$$m''(p_i) = m(p_i) - \#(p_i, I(t_{j+1})) + \#(p_i, Q(t_{j-1})). \quad (6)$$

Тоді:

$$t_{j+1} : m(p_i) \leq \#(p_i, I(t_{j+1})). \quad (7)$$

На рис. 1 зображен формальний опис процесу діагностики ЕД гірничого обладнання, де відповідно кінцеві множини P подій та множина T переходів; I – множина вхідних функцій та Q – множина вихідних функцій.

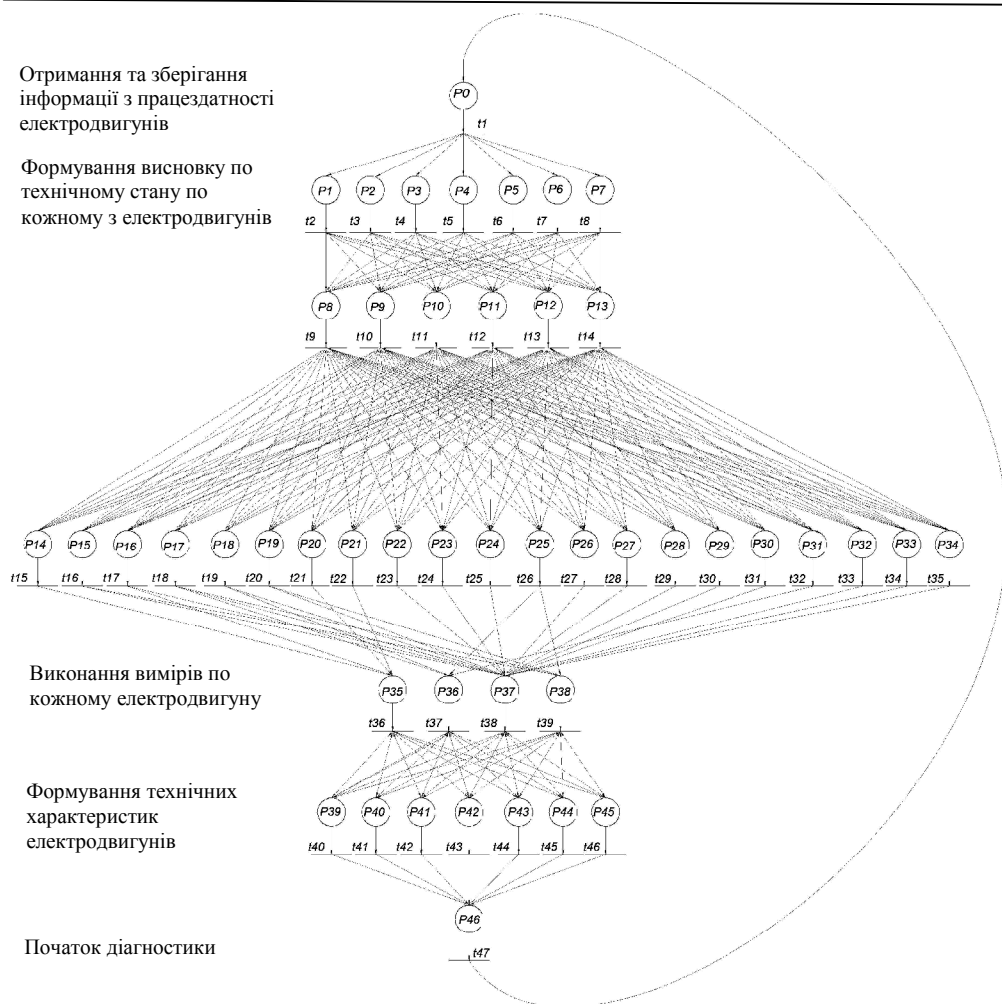


Рис. 1. Модель процесу діагностики шахтних електродвигунів з використанням мереж Петрі

Згідно рис. 1 формальний опис процесу діагностики ЕД гірничого обладнання виглядає наступним чином:

- 1) кінцева множина подій $P = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_{45}, p_{46}\}$,
- 2) кінцева множина переходів $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_{46}, t_{47}\}$,
- 3) множина вхідних функцій $I = \{I(t_1), I(t_2), \dots, I(t_{47})\}$,
- 4) множина вихідних функцій $Q = \{Q(t_1), Q(t_2), \dots, Q(t_{47})\}$.

Послідовність виконання основних етапів моделювання (рис. 1) регламентується наступним алгоритмом виконання процесу діагностики електродвигунів гірничих машин:

- 1) початок діагностики p_0 ;
- 2) подається сигнал на двигуни t_1 ;
- 3) формування технічних характеристик електродвигунів 7 типів $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7$;
- 4) виконуються виміри шести параметрів по кожному електродвигуну $t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8$;
- 5) оцінювання параметрів, а саме навантаження P^u , кВт; напруга $U, В$; струм $I^c, А$; опір ізоляції $R, Ом$; температура $t, ^\circ C$; швидкість обертання ротора n , об/хв: $p_8(P^u, кВт)=[P_k]$, $p_9(U, В)=[U_k]$, $p_{10}(I^c, А)=[I_k]$, $p_{11}(R, Ом)=[R_k]$, $p_{12}(t, ^\circ C)=[t_k]$, $p_{13}(n, об./хв.)=[n_k]$, де $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ – відповідно типи електродвигунів, що діагностуються.
- 6) виконується зіставлення вимірених параметрів $t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}$;
- 7) формування можливих робочих станів електродвигунів $p_{14}, p_{15}, \dots, p_{33}, p_{34}$, причому кожному стану відповідає наступний набір параметрів:

$$C_{k_l} = [P_k, кВт, U_k, В, I_k, А, R_k, Ом, t_k, ^\circ C, n_k, об./хв.], \quad (8)$$

де $l = \overline{1, 2, \dots, f}$ – номер відповідного технічного стану електродвигунів.

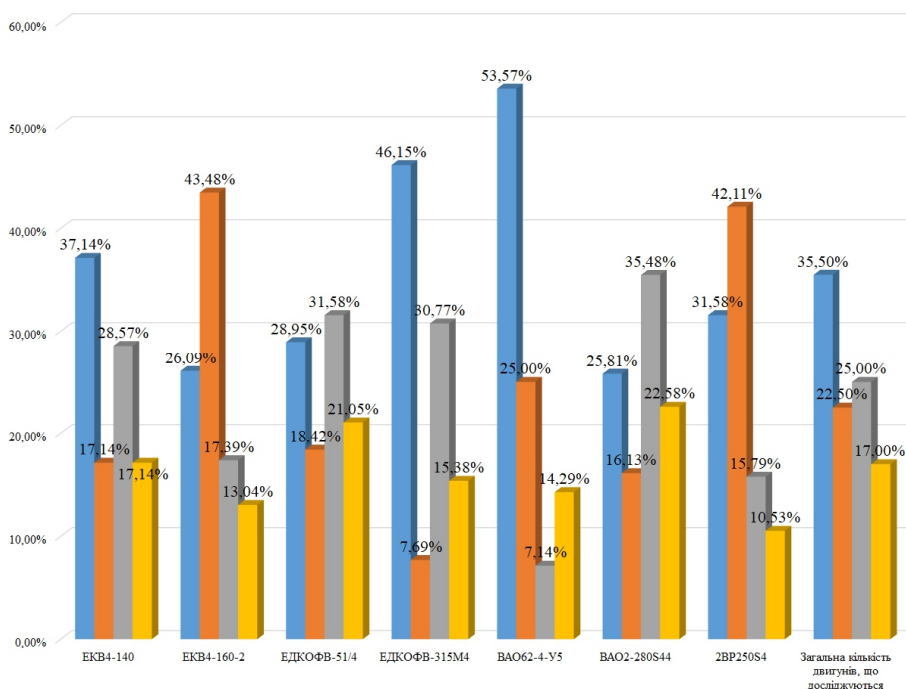
- 8) передача отриманих параметрів відповідного робочого стану електродвигунів $t_{15}, t_{16}, \dots, t_{34}, t_{35}$;
- 9) формування прийняття рішення щодо технічного стану відповідно до отриманих результатів зіставлення вимірених параметрів: p_{35} – нормальна експлуатація; p_{36} – поточний ремонт електродвигуна; p_{37} – капітальний ремонт ЕД; p_{38} – повна заміна пошкоджених деталей на електротехнічному заводі;
- 10) передача діагнозу поточного стану по кожному з двигунів $t_{36}, t_{37}, t_{38}, t_{39}$;
- 11) формування висновку по технічному стану по кожному з електродвигунів, що діагностуються, $p_{39}, p_{40}, p_{41}, p_{42}, p_{43}, p_{44}, p_{45}$;
- 12) передача відомостей про поточний стан електродвигунів в інформаційну мережу $t_{40}, t_{41}, t_{42}, t_{43}, t_{44}, t_{45}, t_{46}$;
- 13) отримання та зберігання інформації з працездатності електродвигунів в системі p_{46} ;
- 14) за необхідності повторення процесу збирання інформації щодо моніторингу електродвигунів t_{47} .

Згідно зазначених умов можна сформувати для заданої схеми динамічну модель, що визначається наступною системою рівнянь:

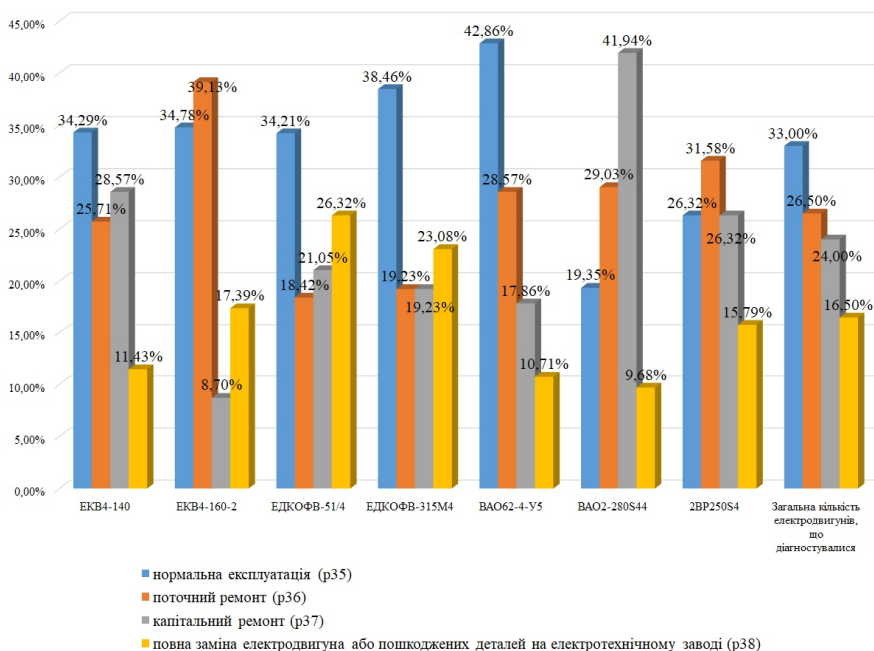
$$\begin{aligned}
& \left\{ \begin{aligned}
& m'(p_0) = m(p_0) - 1(\#(p_0, I(t_1)) = 1) - 1(\#(p_{46}, I(t_{47})) = 1) + \\
& + 1(\#(p_0, Q(t_{47})) = 1), \\
& m'(p_1) = m(p_1) - 1(\#(p_1, I(t_1)) = 1) + 1(\#(p_1, Q(t_2)) = 1), \\
& \dots \\
& m'(p_{14}) = m(p_{14}) - 1(\#(p_{14}, I(t_9)) = 1) - 1(\#(p_{14}, I(t_{10})) = 1) - 1(\#(p_{14}, I(t_{11})) = 1) - \\
& - 1(\#(p_{14}, I(t_{12})) = 1) - 1(\#(p_{14}, I(t_{13})) = 1) - 1(\#(p_{14}, I(t_{14})) = 1) + \\
& + 1(\#(p_{14}, Q(t_{15})) = 1), \\
& m''(p_{14}) = m(p_{14}) - 1(\#(p_{14}, I(t_{15})) = 1) + 1(\#(p_{14}, Q(t_9)) = 1) + 1(\#(p_{14}, Q(t_{10})) = 1) + \\
& + 1(\#(p_{14}, Q(t_{11})) = 1) + 1(\#(p_{14}, Q(t_{12})) = 1) + 1(\#(p_{14}, Q(t_{13})) = 1) + \\
& + 1(\#(p_{14}, Q(t_{14})) = 1), \\
& \dots \\
& m'(p_{45}) = m(p_{45}) - 1(\#(p_{45}, I(t_{36})) = 1) - 1(\#(p_{45}, I(t_{37})) = 1) - 1(\#(p_{45}, I(t_{38})) = 1) - \\
& - 1(\#(p_{45}, I(t_{39})) = 1) + 1(\#(p_{45}, Q(t_{46})) = 1), \\
& m''(p_{45}) = m(p_{45}) - 1(\#(p_{45}, I(t_{46})) = 1) + 1(\#(p_{45}, Q(t_{36})) = 1) + 1(\#(p_{45}, Q(t_{37})) = 1) + \\
& + 1(\#(p_{45}, Q(t_{38})) = 1) + 1(\#(p_{45}, Q(t_{39})) = 1), \\
& m'(p_{46}) = m(p_{46}) - 1(\#(p_{46}, I(t_{40})) = 1) - 1(\#(p_{46}, I(t_{41})) = 1) - \\
& - 1(\#(p_{46}, I(t_{42})) = 1) - 1(\#(p_{46}, I(t_{43})) = 1) - 1(\#(p_{46}, I(t_{44})) = 1) - \\
& - 1(\#(p_{46}, I(t_{45})) = 1) - 1(\#(p_{46}, I(t_{46})) = 1) + 1(\#(p_{46}, Q(t_{47})) = 1).
\end{aligned} \right.
\end{aligned}$$

Для діагностики було обрано 200 електродвигунів з різними технічними станами (ЕКВ4-140 – 35 шт., ЕКВ4-160-2 – 23 шт., ЕДКОФВ-51/4 – 38 шт., ЕДКОФВ-315М4 – 26 шт., ВАО62-4-У5 – 28 шт., ВАО2-280S44 – 31 шт., 2ВР250S4 – 19 шт.), що можна класифікувати за чотирма класами: нормальна експлуатація, поточний ремонт, капітальний ремонт та повний вихід з ладу.

У відповідності до моделювання процесу діагностики були отримані наступні результати, що зображені на рис. 2, де виконується порівняння відомих емпіричних даних щодо досліджуваних електродвигунів з результатами їх діагностики за допомогою мереж Петрі. Розходження результатів дослідження технічного стану електродвигунів від емпіричних значень наведено в табл. 1 та зображено на рис. 3.



а) емпіричні значення станів об'єктів, що досліджуються



б) модельні результати, отримані з використанням мереж Петрі

Рис. 2. Результати математичного моделювання процесу діагностики 7 типів електродвигунів з використанням мереж Петрі

Таблиця 1

Результати виконання діагностики двигунів з використанням мереж Петрі в порівнянні з емпіричними показниками

Тип електродвигунів	Відхилення від емпіричних значень			
	нормальна експлуатація, %	поточний ремонт, %	капітальний ремонт, %	повна заміна, %
ЕКВ4-140	-2,86%	+8,57%	0,00%	-5,71%
ЕКВ4-160-2	+8,70%	-4,35%	-8,70%	+4,35%
ЕДКОФВ-51/4	-5,26%	0,00%	-10,53%	+5,26%
ЕДКОФВ-315М4	-7,69%	+11,54%	-11,54%	+7,69%
ВАО62-4-У5	-10,71%	+3,57%	+10,71%	-3,57%
ВАО2-280S44	-6,45%	+12,90%	+6,45%	-12,90%
2BP250S4	-5,26%	-10,53%	+10,53%	+5,26%
Загальна кількість двигунів, що досліджуються	-2,50%	4,00%	-1,00%	-0,50%

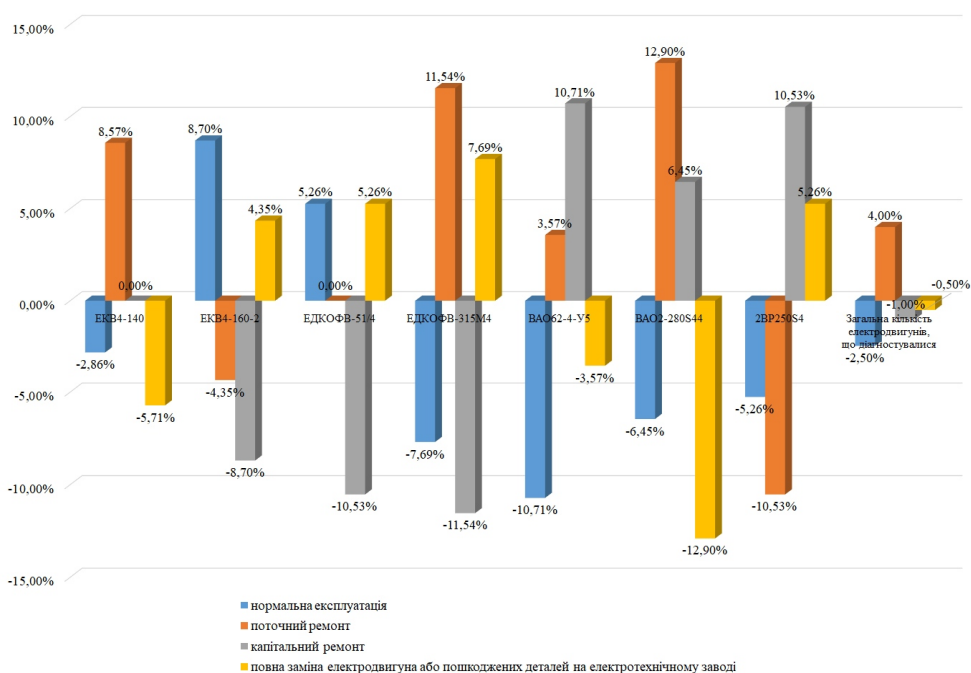


Рис. 3. Відхилення отриманих результатів моделювання від емпіричних значень

Висновки. В результаті виконаних досліджень запропоновано математичну модель процесу діагностики електродвигунів на основі

мереж Петрі. Проведений аналіз результатів моделювання дозволив визначити стани системи діагностики електродвигунів при всіх використовуваних в процесі моделювання алгоритмах управління. Отримані результати моделювання показали, що досліджувані типи електродвигунів ефективно діагностуються за умови безперервного контролю поточного стану, середні величини відхилення залишалися на рівні 6%. Значні відхилення при діагностиці деяких типів електродвигунів можуть впливати на якість ремонту і їх експлуатацію в подальшому, тому в тих випадках, коли відхилення становили величину, що перевершує 10%, при моделюванні додатково враховувалися крім енергомеханічних параметрів, також несприятливі умови експлуатації на промислових підприємствах електрообладнання, що діагностується, конструктивні особливості. В якості наукової новизни проведеного дослідження слід зазначити розроблену та обґрунтовану математичну модель поточного контролю технічного стану та діагностики несправностей електродвигунів на основі мереж Петрі може бути використана для проведення безперебійного контролю електромеханічного обладнання в режимі реального часу, що, в свою чергу, дозволить усунути недоліки існуючої системи планово-попереджувальних ремонтів і уникнути значних економічних та енергетичних втрат на підприємствах.

Список літератури:

1. *Altukhova T.* Analysis of the structure and systems of diagnosis of electromechanical equipment for coal mining / *T. Altukhova* // The development of technical sciences: Conference Proceedings. – Baltija Publishing, 2018. – P. 147-150.
2. *Choudhary A.* Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review / *A. Choudhary, D. Goyal, S. Shimi* // Computat Methods. – 2019. – Vol. 26. – P. 1221-1238.
3. *Cu L.* Quantitative diagnosis of fault severity trend of rolling element bearings/ *L. Cu, C. Ma, F. Zhang* // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 28 (6). – P. 1254-1260.
4. *Ahmadzadeh F.* Remaining useful life prediction of grinding mill liners using an artificial neural network / *F. Ahmadzadeh, J. Lundberg* // Minerals Engineering. – 2013. – Vol. 53. – P. 1-8.
5. *Zheng. J.* A rolling bearing fault diagnosis approach based on LCD and fuzzy entropy / *J. Zheng, J. Cheng, Y. Yang* // Mechanism and Machine Theory. – 2013. – Vol. 70. – P. 441-453.
6. *Baban C.* Using a fuzzy logic approach for the predictive maintenance of textile machines / *C. Baban, M. Baban, M. Suteu* // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2016. – Vol. 30 (2). – P. 999-1006.
7. *Chen B.* Wind turbine pitch faults prognosis using apriori knowledge-based ANFIS / *B. Chen, P. Matthews, P. Tavner* // Expert Systems with Applications. – 2013. – Vol. 40 (17). – P. 6863-6876.
8. *Zhang C.* Tool Condition Monitoring and Remaining Useful Life Prognostic Based on a Wireless Sensor / *C. Zhang, X. Yao, J. Zhang* // Milling Operations. Sensors. – 2016. –

Vol. 16 (6). – P. 795-804.

9. Еремеев Б.Н. Разработка программного комплекса для моделирования параллельных процессов работы сердца / Б.Н. Еремеев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4 (9). – С. 42-46.

10. Новикова Е.И. Анализ и алгоритмизация процесса диагностики острого панкреатита на основе имитационного моделирования / Е.И. Новикова // Вестник ВГТУ. – 2011. – Т. 7. – № 1. – С. 117-120.

11. Корнев Д.А., Исследование алгоритмов работы информационной системы с использованием математического аппарата сетей Петри / Д.А. Корнев, Е.Ю. Логинова // Cloud of Science. – 2014. – Т. 1. – № 2. – С. 318-326.

12. Шестаков А.М. Моделирование программы таксономии технологий изготовления деталей машиностроительного профиля с помощью сетей Петри / А.М. Шестаков // Программные продукты и системы. – 2014. – № 2. – С. 161-164.

13. Ханова А.А. Моделирование конфигурации сложных систем на основе сетей Петри / А.А. Ханова, А.А. Мунтянова, К.И. Аверьянова // Научный вестник НГТУ. – 2018. – Т. 71. – № 2. – С. 39-58.

14. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой / И.А. Ломазова. – М.: Научный мир. – 2004. – 208 с.

15. Трухин М.П. Моделирование сигналов и систем. Сетевые модели / М.П. Трухин. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. – 2018. – 204 с.

References:

1. Altukhova, T. (2018), "Analysis of the structure and systems of diagnosis of electromechanical equipment for coal mining". *The development of technical sciences: Conference Proceedings*. Baltija Publishing, pp. 147–150.
2. Choudhary A., Goyal D., and Shimi S. (2019), "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review". *Computat Methods*, 26, pp.1221–1238.
3. Cui L.L., Ma C.Q., and Zhang F.B., et al. (2015), "Quantitative diagnosis of fault severity trend of rolling element bearings". *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 28 (6), pp.1254–1260.
4. Ahmadzadeh F., and Lundberg J. (2013), "Remaining useful life prediction of grinding mill liners using an artificial neural network". *Minerals Engineering*, 2013, 53, pp. 1–8.
5. Zheng J., Cheng J., and Yang Y. (2013), "A rolling bearing fault diagnosis approach based on LCD and fuzzy entropy". *Mechanism and Machine Theory*, 70, pp. 441–453.
6. Baban C.F., Baban M., and Suteu M.D. (2016), "Using a fuzzy logic approach for the predictive maintenance of textile machines". *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 30 (2), pp. 999–1006.
7. Chen B., Matthews P.C., and Tavner P.J. (2013), "Wind turbine pitch faults prognosis using apriori knowledge-based ANFIS". *Expert Systems with Applications*, 40 (17), pp. 6863–6876.
8. Zhang C.J., Yao X.F., and Zhang J.M., et al. (2016), "Tool Condition Monitoring and Remaining Useful Life Prognostic Based on a Wireless Sensor in Dry Milling Operations". *Sensors*, 16 (6), pp. 795.
9. Eremeev B.N. (2014), "Development of a software package for simulating parallel processes of the heart". *Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 4/9 (70), pp. 42-46.
10. Novikova E.I. (2011), "Analysis and Algorithmization of the Diagnostic Process of Acute Pancreatitis Based on Simulation Modeling". *Vesnik VSTU*, Vol. 7, No. 1, pp. 117-120.
11. Kornev D.A., and Loginova E.Yu. (2014), "Research of algorithms of information system operation using the mathematical apparatus of Petri nets". *Electronic journal Cloud of*

Science, T. 1, No. 2, pp. 318–326.

12. Shestakov A.M. (2014), "Simulation of the taxonomy program of technologies for manufacturing machine-building parts using Petri nets". *Software products and systems*, No. 2, pp. 161–164.

13. Khanova A.A., Muntianova A.A., and Averyanova K.I. (2018), "Modeling the configuration of complex systems based on Petri nets". *Nauchnyy vestnik NGTU*, Vol. 71, No. 2, pp. 39–58.

14. Lomazova I.A. (2004), *Nested Petri nets: modeling and analysis of distributed systems with an object structure*. Moscow, Scientific world, 208 p.

15. Trukhin M.P. (2018), *Simulation of signals and systems. Network models: a tutorial*, Moscow Trukhin, Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 204 p.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. каф. прикладної математики та інформатики ДонНТУ Башков Євген Олександрович

Надійшла (received) 12.11.2020

Altukhova Tetiana, Assistant
Donetsk National Technical University,
Sc. Shibankova, 2, Pokrovsk, Ukraine, 85301
Tel.: +38 (050) 884-95-96, e-mail: tetiana.altukhova@donntu.edu.ua
ORCID ID: 0000-0002-8255-5725

Dmitrieva Olga, Dr.Sci.Tech, Professor
Donetsk National Technical University
Sc. Shibankova, 2, Pokrovsk, Ukraine, 85301
Tel.: +38 (050) 998-11-75, e-mail: olga.dmytriyeva@donntu.edu.ua
ORCID ID: 0000-0001-8921-8433

УДК 519.876.5:621.313.333

Дослідження технічного стану електродвигунів на основі мереж Петрі / Алтухова Т.В., Дмитрієва О.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2020. – № 2 (4). – С. 105 – 117.

Розглянуто можливість використання мереж Петрі при виконанні контролю технічного стану та діагностики електродвигунів. Розроблено математичну модель процесу діагностики, засновану на використанні нечітких часових мереж Петрі. Контроль технічного стану електродвигуна в моделі здійснювався на основі кластерного аналізу. Опис процесу діагностики здійснювалося з впровадженням множин подій, станів, переходів, вхідних і вихідних функцій, маркерів, параметрів часових затримок. Ил.: 3. Табл.: 1. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: мережа Петрі; технічний стан; процес діагностики; електродвигун; математична модель.

УДК 519.876.5:621.313.333

Исследование технического состояния электродвигателей на основе сетей Петри / Алтухова Т.В., Дмитриева О.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2020. – № 2 (4). – С. 105 – 117.

Рассмотрена возможность использования сетей Петри при выполнении контроля технического состояния и диагностики электродвигателей. Разработана математическая модель процесса диагностики, основанная на использовании нечетких временных сетей Петри. Контроль технического состояния электродвигателя в модели осуществлялся на основе кластерного анализа. Описание процесса диагностики осуществлялось с использованием множеств событий, состояний, переходов, входных и выходных функций, маркеров, параметров временных задержек. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: сеть Петри; техническое состояние; процесс диагностики; электродвигатель; математическая модель.

UDC 519.876.5:621.313.333

Research of technical state of electric motors based on petri nets /Altukhova T., Dmitrieva O. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2020. – № 2 (4). – P. 105 – 117.

In this work, the possibility of using Petri nets when monitoring the technical condition and diagnostics of electric motors is considered. Based on the use of fuzzy temporary Petri nets, a mathematical model of the process diagnostic has been developed. The control of the technical conditions of the electric motor in the model is done based on the cluster analysis. The description of the diagnostic process is carried out using a set of events, states, transitions, input and output functions, markers, parameters of time delays. Figs.: 3. Tabl.: 1. Refs.: 15 titles.

Keywords: Petri net; technical condition; diagnostic process; electric motor; mathematical model.

Інформаційні технології

<i>Алтухова Т.В., Дмитрієва О.А.</i> Дослідження технічного стану електродвигунів на основі мереж Петрі	105
<i>Самигуліна Г.А., Самигуліна З.И.</i> Разработка интеллектуальной технологии управления сложными объектами на основе унифицированной искусственной иммунной системы	118
<i>Дашкевич А.О., Охотська О.В.</i> Обчислювальний інструмент для визначення положень точок огляду із урахуванням видимості поверхні	125

Біологічні та медичні прилади і системи

<i>Velychko O.N.</i> The approach of P wave recognition in ecg signals without pre-processing	134
---	-----