

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ МЕТОДУ АНАЛІЗУ МАРКІВСЬКИХ ПРОЦЕСІВ

Алтухова Т.В., Квітковський І.О.

В статті розглянуто можливість використання методу аналізу марківських процесів під час виконання діагностики стану та технічного обслуговування електротехнічних пристроїв на прикладі електродвигунів. Розроблено модель процесу технічного обслуговування та діагностики стану з урахування електротехнічних показників, яка дозволяє на етапі діагностики враховувати показники електротехнічних параметрів, виходячи з рівня близькості того чи іншого показника до граничних значень, що характеризують класи можливих станів електродвигунів. За отриманими результатами імітаційного моделювання виявлено, що показник граничної ймовірності за кожним станом змінюється в залежності від часових параметрів, а також встановлено вірогідність знаходження електродвигунів в тому чи іншому поточному стані та визначено, що максимальна величина відхилення від емпіричних даних становить приблизно 10% для кожного з типу електродвигунів, однак в загальному випадку абсолютна середня величина відхилення не досягає і 5%.

Ключові слова: математичне моделювання, структурна модель, діагностика, технічний стан, електротехнічні пристрої, марківські процеси.

Вступ. З кожним роком у світі спостерігається досить ефективний розвиток у галузях науки і техніки та в сфері розробки новітніх електротехнічних пристроїв, що обумовлює питання щодо перспектив їх технічного обслуговування задля забезпечення надійності та ефективності експлуатації в технологічних процесах. На сьогоднішній день даний напрямок досліджень спрямований на впровадження більш модернізованих систем моніторингу та технічної діагностики із залученням найсучасніших методів та засобів в галузі інформаційних технологій, тим самим забезпечуючи безперервний поточний контроль за технічним станом працюючих пристроїв без необхідного їх відключення від електричної мережі. Інтелектуальні методи, які застосовуються в таких системах в процесі технічного обслуговування, дозволяють з математичної точки зору зробити опис поведінки об'єкту дослідження та сам процес здійснення моніторингу з урахуванням визначення ймовірних несправностей та технічного стану заздалегідь, що дозволить підвищити надійну експлуатацію

електротехнічних пристроїв в виробничих процесах.

З огляду на це, враховуючі складність самого процесу технічного обслуговування і розробки діагностичних систем та їх актуальність застосування, можна вважати даний напрямок досить перспективним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Зараз на сучасних підприємствах та загалом у всіх сферах діяльності людини використовується дуже багато електротехнічних пристроїв, від яких залежить той чи інший технологічний процес, тому вихід з ладу призводить до досить небезпечних аварійних ситуацій. З огляду на це, останнім часом в галузі технічної діагностики було виконано багато досліджень, в яких застосовувалися різні методи та засоби інформаційних технологій [1], де переважно використовували методи на основі штучних нейронних мереж [2-5], нечіткої логіки [6,7], кластерного аналізу [8], мереж Петрі [9-11] і тощо. Так в статті [2] авторами запропоновано застосування нейромережевих технологій для вирішення питань процесу діагностування технічного стану двигунів транспортних

засобів, що дозволило працювати з реальною інформацією та приймати більш об'єктивні рішення щодо характеру та місцезнаходження несправностей. Іншими авторами [3] було запропоновано використання штучних нейронних мереж для створення послідовних та доступних систем моніторингу стану та діагностики несправностей обертових машин, які будуть оцінювати рівень серйозності та режими їх відмов, а також створювати відповідну стратегію технічного обслуговування. В [4] автори пропонують метод розпізнавання аномалій дистанційного моніторингу вітроенергетичного обладнання в режимі реального часу із застосуванням нейромережових технологій, що дозволить своєчасно та точно ідентифікувати несправності та пошкодження в процесі технічного обслуговування. Наступна наукова робота [5] містить дослідження в сфері діагностики несправностей комп'ютерних мереж, що ґрунтується на поєднанні нейронних мереж із алгоритмом зворотного поширення та нечіткою логікою та дозволило визначити ступень приналежності навчальних вибірок до різних кластерів несправностей мережі. В наступних статтях запропоновано для діагностики контакту вимикача [6] та автомобільних несправностей [7] використовувати нечітку логіку. В першому випадку дозволило здійснити ідентифікацію рівня погіршення контакту в автоматичних вимикачах, а в другому – дозволило ідентифікувати та класифікувати несправності автомобілів в режимі реального часу. В науковій статті [8] представлена модель для моніторингу та діагностики поточного стану електродвигунів із застосуванням алгоритмів кластерного аналізу, а саме нейронної мережі Кохонена, нейронної мережі адаптивного резонансу та екстремального машинного навчання, яка забезпечила проведення діагностичних операцій, виходячи з рівня близькості того чи іншого енергетичного показника до граничних значень, які, в свою чергу, характеризували класи можливих технічних станів електродвигунів. В наступних публікаціях [9-11] здійснено моделювання процесу діагностики технічного стану електродвигунів та ізоляції трансформаторів на основі мереж Петрі, що дозволило здійснювати поточний

контроль діагностичних показників в режимі реального часу та забезпечило визначення залишкового ресурсу їх роботи. Також при моделюванні процесу технічного обслуговування та проведення діагностики стану пристроїв можна використовувати підходи на основі марківських процесів [12, 13]. В роботі [12] авторами запропоновано оптимізацію технічного обслуговування обладнання енергосистеми із використанням ланцюгів Маркова, а вже в [13] запропоновано модель технічного обслуговування сушильного пресу на основі прихованої моделі Маркова для класифікації технічного стану. З огляду на це, здійснення моделювання процесу технічного обслуговування електротехнічних пристроїв на основі методу аналізу марківських процесів, з урахуванням на їх ефективність в моделях, дозволить забезпечити підвищення об'єктивності виконання процесу технічного обслуговування.

Мета. Розробка та дослідження моделі процесу технічного обслуговування та діагностики стану електротехнічних пристроїв, таких як електродвигуни, на основі методу аналізу марківських процесів, спрямованої на об'єктивність оцінювання їх поточного технічного стану.

Виклад основного матеріалу.

Основним напрямком при розробці математичної моделі є виявлення ймовірності появи несправностей в електротехнічному пристрої, тому врахування параметрів, за якими здійснюється моніторинг поточного стану, є головним чинником при її побудові. Враховуючи це, для електродвигунів було обрано множину електротехнічних параметрів [14]:

$$C_i = \begin{pmatrix} P \\ U \\ I \\ R \\ T \\ n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де P – навантаження, кВт;

U – напруга, кВ;

I – струм, А;

R – опір в обмотках електродвигунів, МОм;

T – температура, °С;

n – швидкість обертання, об/хв.

Ці параметри мають значний вплив на поточний технічний стан електродвигунів та контролюються під час діагностики несправностей.

Згідно до обраної множини електротехнічних параметрів (1) було здійснено позначення показників режимів працездатності електродвигунів [14]:

«0» – нормальні показники параметрів;

«+» – підвищення показників параметрів;

«-» – зниження показників параметрів;

«Δ» – відсутність характеристичних показань параметрів.

На рис. 1 представлено дерево відмов електродвигунів, за яким виконується класифікація отриманих режимів відносно чотирьох технічних станів, які надалі враховуються при формуванні структурної моделі процесу технічного обслуговування.

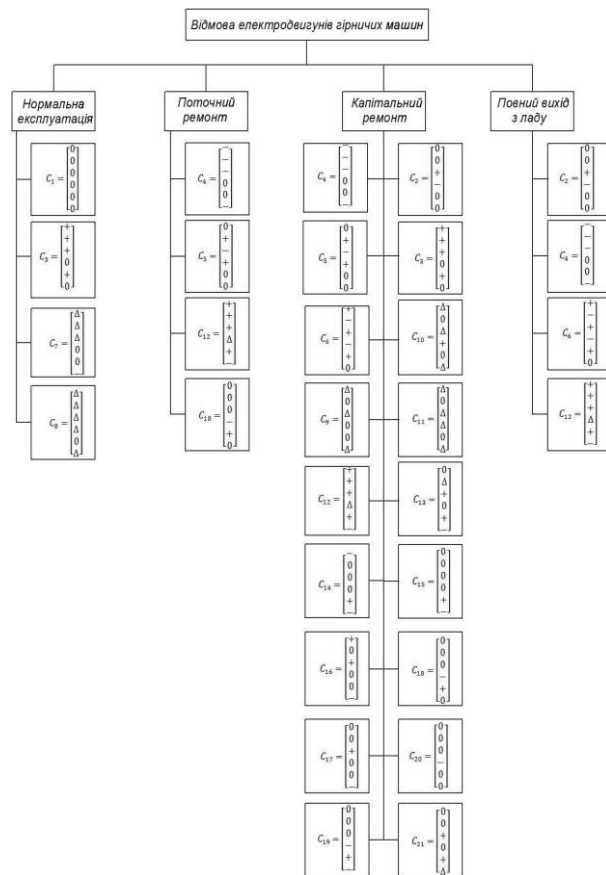


Рис. 1 – Структурне дерево відмов електродвигунів

В процесі контролю технічного стану бере участь M технічних пристроїв, які можуть

знаходитися в різних станах (рис. 2). Дані стани представляють собою множину $S = (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6)$, що відповідає одному з наступних станів:

S_1 – пристрій є справним та продовжує функціонувати;

S_2 – відбувається діагностика несправностей технічних пристроїв;

S_3 – виявлено несправності в роботі технічного пристрою, що передбачає поточний ремонт, який здійснюється при звичайному технічному обслуговуванні;

S_4 – виявлено серйозні несправності технічних пристроїв, для яких передбачається капітальний ремонт з виведенням з процесу експлуатації;

S_5 – повний вихід з ладу технічних пристроїв та їх заміна;

S_6 – завершення операцій з технічного обслуговування пристроїв та їх підготовка і введення в експлуатацію.

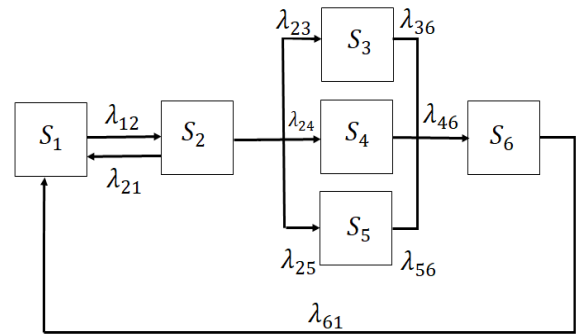


Рис. 2 – Структурна модель процесу технічного обслуговування електротехнічних пристроїв

Враховуючи те, що система ґрунтується на марківському процесі з безперервним часом обслуговування технічних пристроїв, ймовірність будь-якого стану в моделі системи в певний момент часу t визначається як:

$$p_i(t) = P(S(t) = S_i) \quad (2)$$

Причому загальна сума ймовірностей системи повинна задовольняти умові нормування:

$$\sum_{i=1}^M p_i(t) = 1 \quad (3)$$

Окрім того, стани в моделі (рис. 1) характеризуються інтенсивністю надходження потоків технічних пристроїв в системі процесу технічного обслуговування $\lambda_{ij}, i \neq j$.

$$\lambda_{ij} = \frac{P_{ij}}{t_i} \quad (4)$$

P_{ij} – ймовірність перебування в тому чи іншому стані за умови розгалуження циклічних процесів в моделі, в іншому випадку $P_{ij} = 1$;
 $t_i, i = 1 \dots 6$ – відповідає середньому часу перебування технічного пристрою у i -тому стані. Для розробленої системи безперервного технічного контролю стану технічних пристроїв інтенсивність переходів в моделі буде мати залежність від наступних часових параметрів:
 t_1 – середній час безвідмовної роботи технічних пристроїв системи;
 t_2 – середній час проведення моніторингу поточного стану технічних пристроїв;
 t_3 – середній час здійснення поточного ремонту технічних пристроїв;
 t_4 – середній час виконання капітального ремонту технічних пристроїв;
 t_5 – середній час виведення з експлуатації технічного пристрою та його повна заміна;
 t_6 – середній час завершення операцій з технічного обслуговування пристроїв та їх підготовка і введення в експлуатацію.

Математична модель розробленої системи ґрунтується на методі аналізу марківських процесів у вигляді системи рівнянь Колмогорова

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{j=1, j \neq i}^M \lambda_{ij} p_j(t) - \left(\sum_{j=1, j \neq i}^M \lambda_{ij} \right) p_i(t), \quad (5)$$

тоді система рівнянь для системи (рис.2) з урахуванням умови нормування (3) набудатиме наступний вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_{21}p_2(t) + \lambda_{61}p_6(t) - \lambda_{12}p_1(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda_{12}p_1(t) - (\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25})p_2(t) \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = \lambda_{23}p_2(t) - \lambda_{36}p_3(t) \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = \lambda_{24}p_2(t) - \lambda_{46}p_4(t) \\ \frac{dp_5(t)}{dt} = \lambda_{25}p_2(t) - \lambda_{56}p_5(t) \\ \frac{dp_6(t)}{dt} = \lambda_{12}p_1(t) - \lambda_{61}p_6(t) \\ p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 = 1 \end{cases} \quad (6)$$

Так як процес контролю технічного стану пристроїв вважається безперервним процесом $t = \infty$, то $\frac{dp_i(t)}{dt} = 0$. З огляду на це система рівнянь приймає вигляд:

$$\begin{cases} p_1(t) = \frac{\lambda_{21}p_2(t) + \lambda_{61}p_6(t)}{\lambda_{12}} \\ p_2(t) = \frac{\lambda_{12}p_1(t)}{\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25}} \\ p_3(t) = \frac{\lambda_{23}p_2(t)}{\lambda_{36}} \\ p_4(t) = \frac{\lambda_{24}p_2(t)}{\lambda_{46}} \\ p_5(t) = \frac{\lambda_{25}p_2(t)}{\lambda_{56}} \\ p_6(t) = \frac{\lambda_{12}p_1(t)}{\lambda_{61}} \\ p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) + p_5(t) + p_6(t) = 1 \end{cases} \quad (7)$$

Враховуючи середній час перебування технічного пристрою у i -тому стані та виконання відповідних перетворень і умову нормування, граничні ймовірності визначаються наступним чином:

$$\left\{ \begin{aligned} p_{rp1} &= \frac{t_1}{t_1 + t_2 + P_{23}t_3 + P_{24}t_4 + P_{25}t_5 + t_6} \\ p_{rp2} &= \frac{t_2}{t_1 + t_2 + P_{23}t_3 + P_{24}t_4 + P_{25}t_5 + t_6} \\ p_{rp3} &= \frac{P_{23}t_3}{t_1 + t_2 + P_{23}t_3 + P_{24}t_4 + P_{25}t_5 + t_6} \\ p_{rp4} &= \frac{P_{24}t_4}{t_1 + t_2 + P_{23}t_3 + P_{24}t_4 + P_{25}t_5 + t_6} \\ p_{rp5} &= \frac{P_{25}t_5}{t_1 + t_2 + P_{23}t_3 + P_{24}t_4 + P_{25}t_5 + t_6} \\ p_{rp6} &= \frac{t_6}{t_1 + t_2 + P_{23}t_3 + P_{24}t_4 + P_{25}t_5 + t_6} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Дослідження моделі виконувалося за отриманими показниками електротехнічних параметрів та результатами імітаційного моделювання процесу технічного обслуговування електротехнічних пристроїв, що в загальному вигляді представлені на рис. 3.

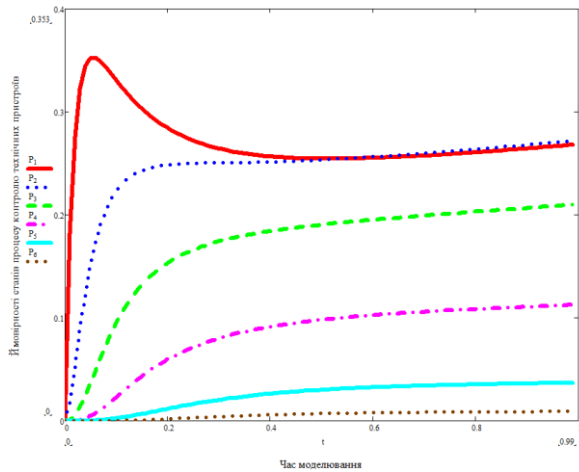


Рис. 3 – Результати імітації процесу технічного обслуговування електродвигунів за розробленою моделлю

Враховуючи те, що на етапі діагностики несправностей (S_2) відбувався моніторинг контролюючої множини параметрів (1), було виконано визначення поточного технічного стану електродвигунів за вибірковою сукупністю обсягом 200 спостережень щодо електродвигунів 7 типів (ЕКВ4-140 – 35 шт., ЕКВ4-160-2 – 23 шт., ЕДКОФВ-51/4 – 38 шт., ЕДКОФВ-315M4 – 26 шт., ВАО62-4-У5 – 28 шт., ВАО2-280S4 – 31 шт., 2BP250S4 – 19 шт.), емпіричні дані яких наведені на рис.4 [14]. В процесі реалізації даного етапу були отримані результати (рис. 5, а) та виявлені їх відхилення

від емпіричних показників (рис. 5, б).

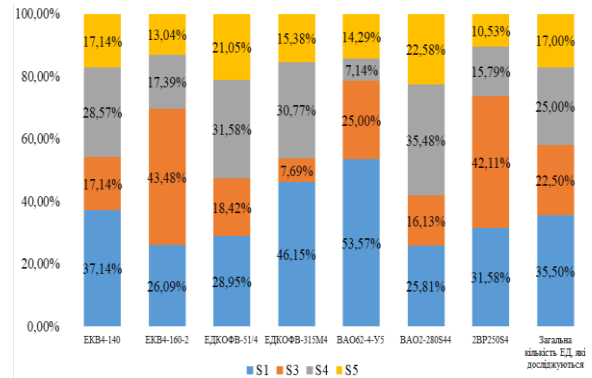
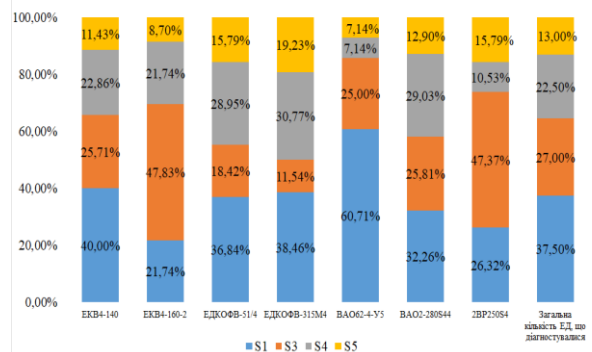
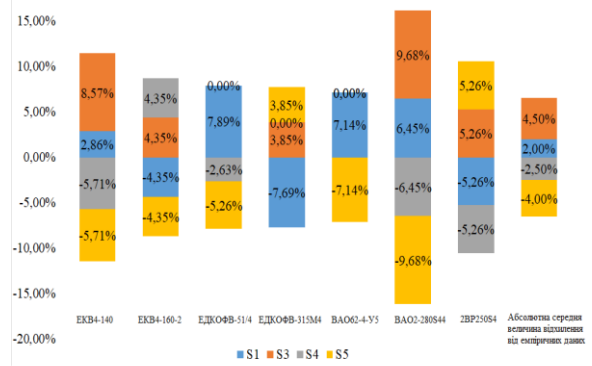


Рис. 4 – Емпіричні дані, які отримані за вибірковою сукупністю спостережень за електродвигунами



а)



б)

Рис. 5 – Дослідження процесу проведення діагностики несправностей (S_2) та визначення поточного технічного стану електродвигунів (S_1, S_3, S_4, S_5): а) результати реалізації; б) відхилення отриманих результатів дослідження від емпіричних даних

Висновки. Запропоновано математичну модель процесу технічного обслуговування та

діагностики стану електротехнічних пристроїв, таких як електродвигуни, на основі методу аналізу марківських процесів, де були враховані при діагностиці несправностей множини контролюючих параметрів. За отриманими результатами імітаційного моделювання було встановлено вірогідність знаходження електродвигунів в тому чи іншому поточному стані та виявлено, що показник граничної ймовірності за кожним станом змінюється в залежності від часових параметрів. Також при дослідженні процесу проведення діагностики несправностей (S_2) та визначення поточного технічного стану електродвигунів (S_1, S_3, S_4, S_5)

встановлено, що максимальна величина відхилення від емпіричних даних становить приблизно 10% для кожного з типу електродвигунів, однак в загальному випадку абсолютна середня величина відхилення не досягає і 5%.

З огляду на це, розроблена модель дозволить підвищити надійність та об'єктивність оцінювання поточного стану електротехнічних пристроїв під час експлуатації та уникнути аварійних ситуацій з урахуванням рівня близькості того чи іншого показника до граничних значень, що характеризують класи можливих станів.

Література

- [1] Т. В. Алтухова. Методи діагностики відмов електромеханічного обладнання на основі технологій штучного інтелекту. Наукові праці ДонНТУ, серія "Електротехніка і енергетика", №1(18), 2017. С. 59-68
- [2] A. Molodan, O. Polyanskii, Ye. Dubinin, M. Poltavskii. Diagnostics of the technical condition of vehicles engines with neuron networks technology usage. *Transport, ecology – sustainable development* 30, 2023. P. 110 - 121
- [3] M. Maurya, I. Panigrahi, D. Dash, Ch. Malla. Intelligent fault diagnostic system for rotating machinery based on IoT with cloud computing and artificial intelligence techniques: a review. *Application of soft computing*, Volume 28, 2024. P. 477–494
- [4] X. Ding, Y. Gong, Ch. Wang, Zh. Zheng. Artificial intelligence based abnormal detection system and method for wind power equipment. *International Journal of Thermofluids*, Volume 21, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100569>
- [5] E. Bideh, M. F. Amiri, J. Vahidi, M. Iranmanesh. Automatic fault diagnosis of computer networks based on a combination BP neural network and fuzzy logic. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, Volume 15, Issue 5, 2024. P. 177-187. Doi: 10.22075/IJNAA.2022.29622.4208
- [6] Ronimack T. Souza, George R. S. Lira, Edson G. Costa, Adriano C. Oliveira, Antonio F. Leite Neto. Methodology for Circuit Breaker Contact Diagnosis through Dynamic Resistance Measurements and Fuzzy-Logic-Based Analysis. *Energies*, 17(8), 2024. <https://doi.org/10.3390/en17081869>
- [7] Maureen Akazue, John Ashie, Abel Edje. An intelligent fuzzy logic automobile fault diagnostic system. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, Volume 9, Issue 2, 2024. P. 1779-1787. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24FEB1293>
- [8] Т. В. Алтухова Розробка комп'ютерної моделі системи діагностики технічного стану на основі кластерного аналізу / О. А. Дмитрієва, Т. В. Алтухова, Є. О. Бабенко// Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка» № 1(32)'2021.– С.24-31. DOI: 10.31474/1996-1588-2021-1-32-24-31
- [9] Алтухова Т.В. 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.104-116. <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2020.02.01>
- [10] Алтухова Т. В. Математичне моделювання процесу діагностики технічного стану ізоляції трансформаторів із застосуванням мереж Петрі / Т. В. Алтухова// Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка» № 2(33),2021-1(34),2022.– С.33-39. DOI: 10.31474/1996-1588-2021-2-33-33-39
- [11] T. Altukhova. Computer modeling of the system of technical diagnostics of electric motors with the use of Petri nets. *Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective*

monograph /Altukhova T. – etc. – International Science Group. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. P. 54-73. DOI: 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1.3.1

[12] Mohammad Zarei, Mohammad Bagheri, Payman Dehghanian. Markov-chain-driven optimization of inspection-based maintenance, Part II: Numerical analysis and practical insights. *Electric Power Systems Research*, Volume 227, Part A, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109922>

[13] Alexandre Martins, Inácio Fonseca, José Torres Farinha, João Reis, António J. Marques Cardoso. Prediction maintenance based on vibration analysis and deep learning - A case study of a drying press supported on a Hidden Markov Model. *Applied Soft Computing*, Volume 163, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111885>

[14] Т. В. Алтухова. Комп'ютерне моделювання систем діагностики технічного стану електродвигунів гірничих машин: автореф. дис. канд. техн. наук: 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи / Т.В. Алтухова - Покровськ, 2021.- 25 с.

References

[1] T. V. Altukhova. Metody diahnostyky vidmov elektromekhanichnoho obladnannia na osnovi tekhnolohii shtuchnoho intelektu. *Naukovi pratsi DonNTU, seriia "Elektrotekhnika i enerhetyka"*, №1(18), 2017. S. 59-68

[2] A. Molodan, O. Polyanskii, Ye. Dubinin, M. Poltavskii. Diagnostics of the technical condition of vehicles engines with neuron networks technology usage. *Transport, ecology – sustainable development* 30, 2023. P. 110 - 121

[3] M. Maurya, I. Panigrahi, D. Dash, Ch. Malla. Intelligent fault diagnostic system for rotating machinery based on IoT with cloud computing and artificial intelligence techniques: a review. *Application of soft computing*, Volume 28, 2024. P. 477–494

[4] X. Ding, Y. Gong, Ch. Wang, Zh. Zheng. Artificial intelligence based abnormal detection system and method for wind power equipment. *International Journal of Thermofluids*, Volume 21, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100569>

[5] E. Bideh, M. F. Amiri, J. Vahidi, M. Iranmanesh. Automatic fault diagnosis of computer networks based on a combination BP neural network and fuzzy logic. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, Volume 15, Issue 5, 2024. P. 177-187. Doi: 10.22075/IJNAA.2022.29622.4208

[6] Ronimack T. Souza, George R. S. Lira, Edson G. Costa, Adriano C. Oliveira, Antonio F. Leite Neto. Methodology for Circuit Breaker Contact Diagnosis through Dynamic Resistance Measurements and Fuzzy-Logic-Based Analysis. *Energies*, 17(8), 2024. <https://doi.org/10.3390/en17081869>

[7] Maureen Akazue, John Ashie, Abel Edje. An intelligent fuzzy logic automobile fault diagnostic system. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, Volume 9, Issue 2, 2024. P. 1779-1787. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24FEB1293>

[8] T. V. Altukhova Rozrobka kompiuternoi modeli systemy diahnostyky tekhnichnoho stanu na osnovi klasternoho analizu / O. A. Dmytriieva, T. V. Altukhova, Ye. O. Babenko// *Naukovi pratsi DonNTU. Seriia: «Informatyka, kibernetyka ta obchysliuvalna tekhnika»* № 1(32)2021.– S.24-31. DOI: 10.31474/1996-1588-2021-1-32-24-31

[9] Altukhova T.V. Doslidzhennia tekhnichnoho stanu elektrodvyhuniv na osnovi merezh Petri / Altukhova T.V., Dmytriieva O.A. // *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriia: Informatyka ta modeliuvannia. – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2020. – № 2(4). - S.104-116. <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2020.02.01>

[10] Altukhova T. V. Matematychnе modeliuvannia protsesu diahnostyky tekhnichnoho stanu izoliatsii transformatoriv iz zastosuvanniam merezh Petri / T. V. Altukhova// *Naukovi pratsi DonNTU. Seriia: «Informatyka, kibernetyka ta obchysliuvalna tekhnika»* № 2(33),2021-1(34),2022.– S.33-39. DOI: 10.31474/1996-1588-2021-2-33-33-39

[11] T. Altukhova. Computer modeling of the system of technical diagnostics of electric motors with the use of Petri nets. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph /Altukhova T. – etc. – International Science Group. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. P. 54-73. DOI: 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1.3.1

- [12] Mohammad Zarei, Mohammad Bagheri, Payman Dehghanian. Markov-chain-driven optimization of inspection-based maintenance, Part II: Numerical analysis and practical insights. Electric Power Systems Research, Volume 227, Part A, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109922>
- [13] Alexandre Martins, Inácio Fonseca, José Torres Farinha, João Reis, António J. Marques Cardoso. Prediction maintenance based on vibration analysis and deep learning - A case study of a drying press supported on a Hidden Markov Model. Applied Soft Computing, Volume 163, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111885>
- [14] T. V. Altukhova. Komp'uterne modeliuvannia system diahnostryky tekhnichnoho stanu elektrodvyhuniv hirnychkykh mashyn: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk: 01.05.02 - matematychnе modeliuvannia ta obchysluvalni metody / T.V. Altukhova - Pokrovsk, 2021.- 25 s.

Алтухова Тетяна Володимирівна – кандидат технічних наук, Донецький національний технічний університет (вул. Самбірська, 76, м. Дрогобич, Львівська обл., 82111, Україна).

E-mail: tetiana.altukhova@donntu.edu.ua

Квітковський Іван Олександрович – студент магістратури, Донецький національний технічний університет (вул. Самбірська, 76, м. Дрогобич, Львівська обл., 82111, Україна).

E-mail: ivan.kvitkovsky@donntu.edu.ua

MODELLING THE PROCESS OF MAINTENANCE OF ELECTRICAL DEVICES BASED ON THE METHOD OF MARKOV PROCESS ANALYSIS

The article considers the possibility of using the method of analysis of Markov processes when performing diagnostics of the condition and maintenance of electrical devices on the example of electric motors. The article develops a model of the process of maintenance and diagnostics of the state with consideration of electrotechnical indicators, which allows at the stage of diagnostics to take into account indicators of electrotechnical parameters, based on the level of proximity of a particular indicator to the limit values that characterise classes of possible states of electric motors. Based on the results of simulation modelling, it was found that the marginal probability indicator for each state varies depending on the time parameters, and the probability of finding electric motors in a particular current state was determined, and it was determined that the maximum deviation from empirical data is approximately 10% for each type of electric motor, but in general, the absolute average deviation does not reach 5%.

Keywords: mathematical modelling, structural model, diagnostics, technical condition, electrical devices, Markov processes.

Altukhova Tetiana Volodymyrivna - Candidate of Technical Sciences, Donetsk National Technical University (76 Sambirsk St., Drohobych, Lviv Oblast, 82111, Ukraine).

E-mail: tetiana.altukhova@donntu.edu.ua

Kvitkovskiy Ivan Olexandrovych - Master's student, Donetsk National Technical University (76 Sambirsk St., Drohobych, Lviv Oblast, 82111, Ukraine).

E-mail: ivan.kvitkovsky@donntu.edu.ua