

Математичне моделювання процесу діагностики технічного стану ізоляції трансформаторів із застосуванням мереж Петрі

В даній роботі виконано розширення можливостей застосування мереж Петрі для моделювання процесу технічної діагностики. Запропоновано структурну і математичну модель системи контролю діагностичних ознак і поточної діагностики стану ізоляції трансформаторних підстанцій, яка дозволить здійснювати моніторинг технічного стану за умови рівня наближеності значень параметрів відносно граничних показників, що, в свою чергу, класифікуватимуть отримані результати за трьома класами: нормальна робота, пошкодження виткової та міжфазної ізоляції трансформаторних підстанцій. Проведено верифікацію отриманих результатів реалізації представленої моделі та було встановлено, що діагностика поточного стану ізоляції зазначених трансформаторів виконана досить ефективно за умови постійного контролю визначених діагностичних параметрів при середньому абсолютному показнику відхилення в межах 6,19-7,11%, проте у випадку, коли значення максимального показника відхилення при реалізації становитиме понад $\pm 11\%$, то виникає необхідність у врахуванні додаткових параметрів, що впливають на якість процесу технічного обслуговування та експлуатації електрообладнання в подальшому, наприклад, конструкція трансформаторів та несприятливі умови роботи. Виконаний аналіз результатів реалізації дозволив визначити якість роботи розробленої моделі, що контролювалася за двома показниками, а саме часом здійснення діагностики, який становив в середньому 0,024 сек., та досить непоганим збігом результатів її реалізації з еталоном (93,46%), що і обумовило її рекомендацію при моніторингу поточного стану ізоляції трансформаторних підстанцій. Також програмна реалізація отриманої моделі забезпечить поточний контроль діагностичних показників в режимі реального часу та дозволить визначити залишковий ресурс роботи трансформаторів за умови можливого виникнення пошкодження виткової та міжфазної ізоляції ефективніше приблизно на 20% за можливі аналоги, тим самим дозволить знизити кількість появ неконтрольованих аварійних ситуацій, що пов'язані з ними, та зменшити часові, матеріальні і енергетичні втрати.

Ключові слова: математична модель, діагностика поточного стану, діагностичні параметри, ізоляція, трансформаторна підстанція, схема класифікації, мережі Петрі.

DOI: 10.31474/1996-1588-2021-2-33-33-39

Вступ

На сьогоднішній день з розвитком у сфері науки і техніки все частіше виникає актуальне питання з підвищення надійності і ефективності експлуатації сучасного електромеханічного обладнання (ЕМО), яке може бути вирішено за рахунок удосконалення існуючих систем технічної діагностики із використання найсучасніших методів в галузі інформаційних технологій. Враховуючи те, що дані методи дають змогу виконання безперебійного контролю діагностичних параметрів та моніторинг і діагностику поточного стану обладнання без його відключення від мережі та зважаючи на складність даного процесу, то на даний момент їх застосування є досить перспективним.

Інтелектуальні методи дозволяють математично описати поведінку того чи іншого об'єкту за умови визначення його пошкоджень

заздалегідь, тим самим підвищуючи надійність і ефективність експлуатації контрольованого об'єкту.

За останні роки було розроблено досить багато моделей в галузі технічної діагностики з використанням інформаційних технологій, загалом використовувалися штучні нейронні мережі [1, 2], нечітка логіка [3,4], екстремальне машинне навчання [5-7] та багато інших методів. Проте одним з підходів до виконання моніторингу і проведення діагностики ЕМО, який загалом зустрічається в медичній та інформаційній сферах [8,9], а також при визначенні технічного стану електродвигунів [10], можна вважати нечіткі мережі Петрі, які, з огляду на їх ефективність визначення стану об'єктів дослідження в існуючих моделях, дозволять збільшити об'єктивність виконання діагностики електромеханічного обладнання.

Наразі на промислових підприємствах використовують дуже багато різноманітного

обладнання, проте його працездатність залежить від постійного енергоживлення трансформаторів, вихід з ладу яких призводять до таких небажаних наслідків, як зупинка всіх технологічних процесів на виробництві та збільшення витрат, хоча й передбачається резервне живлення, перемикавання на яке потребує деякого часу, саме тому є необхідність у моніторингу їх поточного стану задля попередження появи пошкоджень в них. На даний час у таких наукових працях, як [11-14], представлено розроблені експертні системи контролю характеристик масла, розрядних явищ та аномальних зон і підвищення вібрацій трансформаторних підстанцій, проте визначення поточного стану їх ізоляції практично відсутнє.

Враховуючи вище наведене, **головна мета** даної роботи полягає у розробці та дослідженні математичної моделі процесу діагностики технічного стану ізоляції електромеханічного обладнання із застосуванням мереж Петрі на прикладі трансформаторних підстанцій, що спрямована на отримання об'єктивної оцінки їх поточного стану.

Основним завданням дослідження – підвищення надійності та ефективності працездатності трансформаторних підстанцій і збільшення об'єктивності визначення поточного стану їх ізоляції за рахунок застосування нечітких мереж Петрі в процесі безперервного контролю діагностичних показників.

Обґрунтування застосування нечітких мереж Петрі при розробці математичної моделі діагностики трансформаторних підстанцій

Переважною ідеєю при розробці математичної моделі діагностики стану ізоляції трансформаторних підстанцій із використанням нечітких мереж Петрі є відображення процесу на базі отримання рівнів подій за допомогою переходів і позицій, які дозволять більш ефективно показати виконання відповідних функцій, тим самим забезпечуючи надійну і об'єктивну оцінку поточного стану ізоляції.

Розробка моделі буде ґрунтуватися на використанні відповідного кортежу [10]:

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

де $P = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – множина, що відповідає кінцевій множині подій;

$T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_j\}$ – множина, що відповідає кінцевій множині переходів;

$I(t) = p$ – певні вхідні функції, що визначають кратність вхідних дуг переходів;

$Q(t) = p$ – відповідні вихідні функції, що визначають кратність вихідних дуг переходів;

$M = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_i\}$ – множина, що відповідає маркуванню при $m_i = m(p_i)$, $i = 1 \dots n$;

$Z = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_i\}$ – множина, що відповідає комплексним параметрам затримки

маркерів відносно часу у позиціях отриманої мережі;

$S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_i\}$ – множина, що відповідає ознакам спрацювання маркерів за відповідним часом у позиціях отриманої мережі [10].

В процесі побудови математичної моделі також враховуються відповідні обмеження [10]:

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

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

У відповідності до (2) і (3) перехід $t_j \in T$ повинен забезпечуватися згідно виразу [10]:

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

і як наслідок визначається відповідне маркування:

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

Також необхідно враховувати, що у разі не виконання (4), буде змінюватися визначення маркування за умови виникнення нової умови [10]:

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

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

З вище наведеного, побудова математичної моделі ґрунтуватиметься саме на даних умовах, що дозволить показати більш детальний процес виконання безперервного контролю діагностичних показників та здійснення діагностики поточного стану ізоляції трансформаторів.

Математична модель безперервного контролю енергетичних показників та виконання діагностики стану ізоляції трансформаторних підстанцій

Основним етапом в розробці моделі та при визначенні об'єктивного поточного стану об'єкту вважається виявлення діагностичних параметрів, що певною мірою мають негативний вплив на технічні характеристики. В даному випадку виконано вибір множини енергетичних параметрів, яка приймає вигляд:

$$PC = \begin{bmatrix} U \\ I \end{bmatrix}, \quad (8)$$

PC – показник, що відповідає певному поточному стану відповідно до зазначеного комплексу діагностичних параметрів;

U – показник, що відповідає вимірній напрузі на трансформаторній підстанції, В;

I – показник струму трансформатору, що вимірюється.

У відповідності до отриманої множини (8) виконано формування класифікаційних ознак відносно нормального стану та пошкодження виткової і міжфазної ізоляції трансформаторних підстанцій згідно ДСТ 11677-85 [15], що представлено на рис. 1. Причому виконується врахування показників відхилення напруги і струму від номінальних параметрів для нормальної експлуатації трансформаторних підстанцій, тобто

$\pm 10\%$ для напруги за умови їх відхилення не більш ніж 20 с – 20 хв. та для струму $\pm 5\%$ в межах 1 с – 0,5 хв. [15].

У відповідності до рис. 1 надалі розроблена модель виконання моніторингу комплексу обраних показників та забезпечення процесу діагностики відповідного поточного стану ізоляції трансформаторних підстанцій, що представлена на рис. 2.

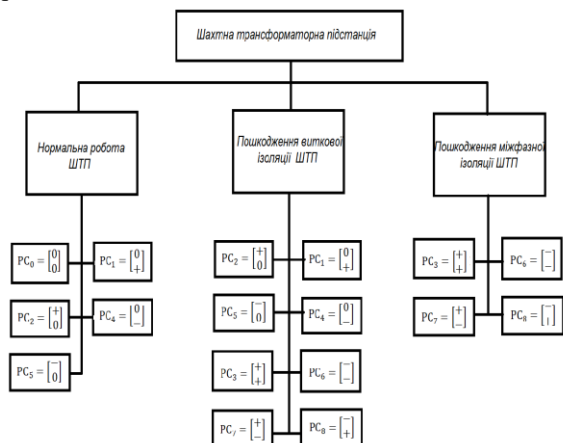


Рисунок 1 – Схематичне зображення класифікації режимів працездатності відносно обраної множини: «0» – показники, що відповідають нормованим значенням; «+», «-» – відповідно підвищення та зниження напруги і струму

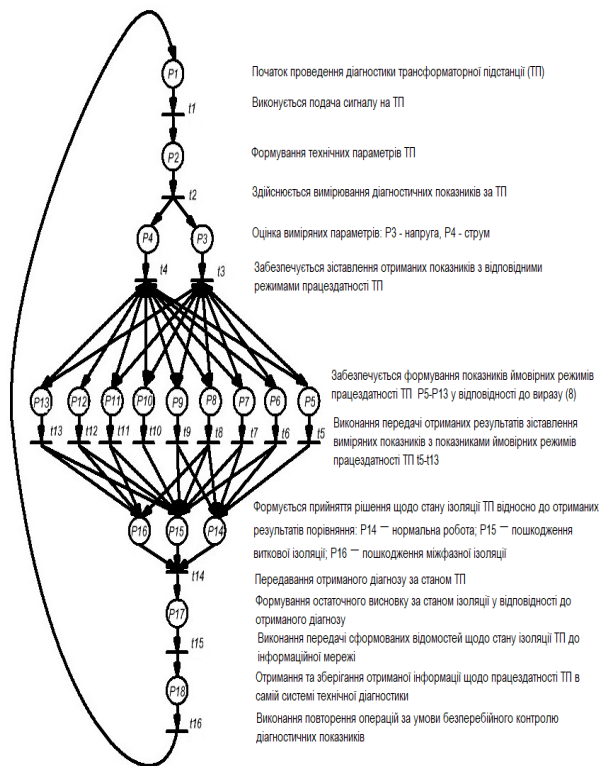


Рисунок 2 – Схема моделі виконання моніторингу комплексу обраних показників та забезпечення процесу діагностики відповідного поточного стану ізоляції трансформаторних підстанцій

Математична модель структурної схеми, що наведена на рис. 2, представлено у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{aligned} m'(P_1) &= m(P_1) - 1(\#(P_1, I(t_1)) = 1) - \\ &- 1(\#(P_{18}, I(t_{16})) = 1) + 1(\#(P_1, Q(t_{16})) = 1) \\ m'(P_2) &= m(P_2) - 1(\#(P_2, I(t_1)) = 1) + \\ &+ 1(\#(P_2, Q(t_2)) = 1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m'(P_6) &= m(P_6) - 1(\#(P_6, I(t_3)) = 1) - \\ &- 1(\#(P_6, I(t_4)) = 1) + 1(\#(P_6, Q(t_6)) = 1) \\ m''(P_6) &= m(P_6) - 1(\#(P_6, I(t_6)) = 1) + \\ &+ 1(\#(P_6, Q(t_3)) = 1) + 1(\#(P_6, Q(t_4)) = 1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m'(P_{14}) &= m(P_{14}) - 1(\#(P_{14}, I(t_5)) = 1) - \\ &- 1(\#(P_{14}, I(t_6)) = 1) - 1(\#(P_{14}, I(t_7)) = 1) - \\ &- 1(\#(P_{14}, I(t_8)) = 1) - 1(\#(P_{14}, I(t_9)) = 1) + \\ &+ 1(\#(P_{14}, Q(t_{14})) = 1) \\ m'(P_{15}) &= m(P_{15}) - 1(\#(P_{15}, I(t_6)) = 1) - \\ &- 1(\#(P_{15}, I(t_7)) = 1) - 1(\#(P_{15}, I(t_8)) = 1) - \\ &- 1(\#(P_{15}, I(t_9)) = 1) - 1(\#(P_{15}, I(t_{10})) = 1) - \\ &- 1(\#(P_{15}, I(t_{11})) = 1) - 1(\#(P_{15}, I(t_{12})) = 1) - \\ &- 1(\#(P_{15}, I(t_{13})) = 1) + 1(\#(P_{15}, Q(t_{14})) = 1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m'(P_{18}) &= m(P_{18}) - 1(\#(P_{18}, I(t_{15})) = 1) + \\ &+ 1(\#(P_{18}, Q(t_{16})) = 1) \end{aligned}$$

Отримана математична модель реалізується за умови наступного алгоритму, що представлений на рис. 3.

Дослідження об'єктивності виконання технічної діагностики стану ізоляції трансформаторних підстанцій при застосуванні розробленої моделі на основі мереж Петрі

Дослідження об'єктивності здійснення діагностики ізоляції трансформаторних підстанцій проводилося у відповідності до зібраних статистичних даних за вибірковою сукупністю загальним обсягом 120 спостережень відносно 6 видів шахтних підземних трансформаторів (ТСВП-400/6 – 18 шт., КТПВ-400/6 – 15 шт., ТСВП-630/6 – 22 шт., КТПВ-630/6 – 20 шт., ТСВП-1000/6 – 25 шт., КТПВ-1000/6 – 20 шт.). На рис. 4 наведена гістограма розподілу отриманих даних відносно трьох класів класифікації, що наведені на рис. 1. Результати виконаної реалізації отриманої моделі представлені на рис. 5.

Якість виконання реалізації розробленої моделі із використанням мереж Петрі визначалася за двома параметрами:

- 1) час виконання роботи моделі в процесі

здійснення аналізу показників, що були отримані;

2) збіг результатів виконання діагностики з еталоном (рис. 3).

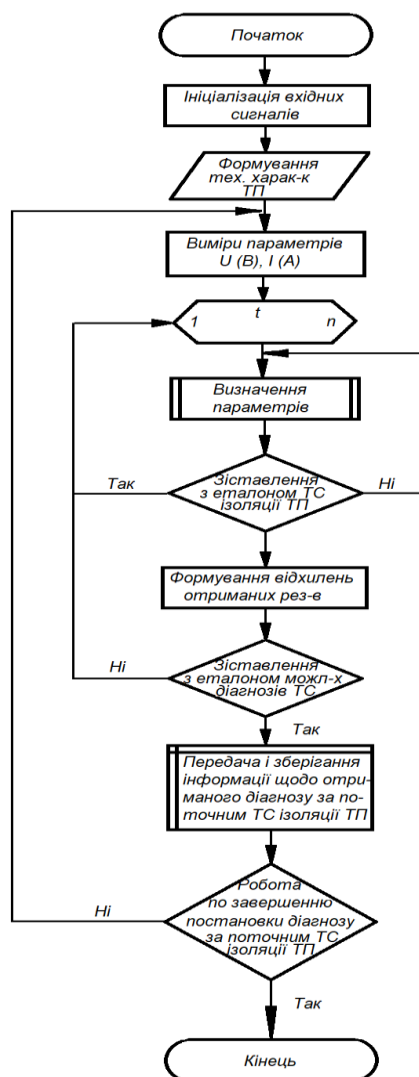


Рисунок 3 – Запропонований алгоритм реалізації отриманої моделі безперервного контролю і діагностики поточного стану ізоляції трансформаторної підстанції

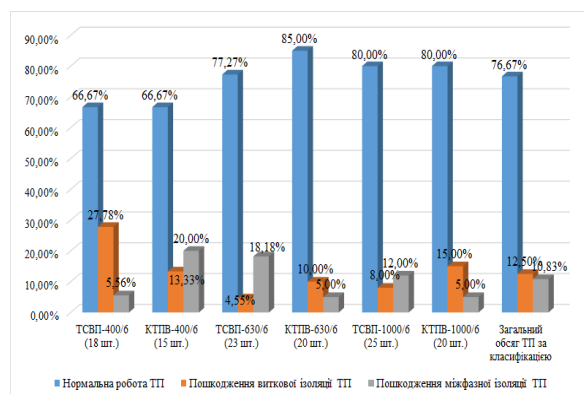


Рисунок 4 – Гістограма розподілу отриманих статистичних даних по трансформаторним підстанціям за вибірковою сукупністю

В процесі моделювання зазначені результати виконання діагностики ізоляції трансформаторних підстанцій (рис. 5) порівняні з емпіричними показниками та визначено їх показники розходження (рис. 6), причому час реалізації за умови виконання аналізу становив в середньому 0,024 сек.

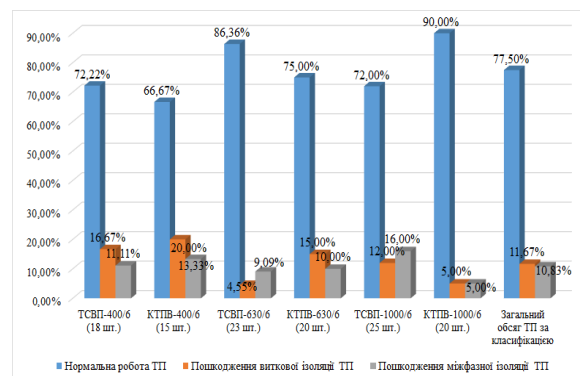


Рисунок 5 – Гістограма розподілу отриманих результатів реалізації моделі безперервного контролю енергетичних параметрів і діагностики стану ізоляції трансформаторних підстанцій

На рис. 6 видно, що максимальне відхилення від емпіричних даних при здійсненні діагностики ізоляції даною моделлю становить в межах $\pm 11,11\%$, причому абсолютне відхилення її при реалізації складає 6,19-7,11%.

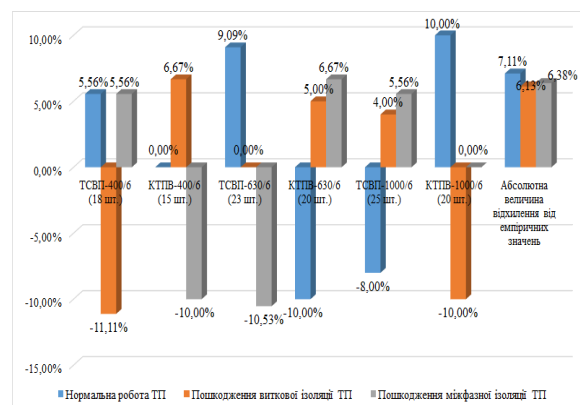


Рисунок 6 – Розходження результатів реалізації моделі з етальонними показниками

Висновки

Результатом виконаного дослідження є розширення можливостей використання мереж Петрі для розробки та дослідження моделі системи безперервного контролю енергетичної множини показників і здійснення технічного діагностування поточного стану ізоляції трансформаторних підстанцій. Виконано верифікацію отриманих результатів проведеного дослідження та було встановлено, що діагностика поточного стану

ізоляції зазначених трансформаторних підстанцій виконана досить ефективно за умови постійного контролю визначених діагностичних параметрів при середньому абсолютному показнику відхилення в межах 6,19-7,11%, проте у випадку, коли значення максимального показника відхилення при реалізації становитиме понад $\pm 11\%$, то виникає необхідність врахування додаткових параметрів, що впливають на якість процесу технічного обслуговування, наприклад, конструкція трансформаторів та несприятливі умови експлуатації. Дана модель забезпечить визначення залишкового ресурсу роботи трансформаторних підстанцій за умови можливого виникнення пошкодження виткової та міжфазної ізоляції приблизно на 20% за можливі аналоги.

В процесі реалізації також виконано аналіз якості запропонованого алгоритму за двома параметрами і визначено, що часові витрати на проведення аналізу становили в середньому 0,024 сек., та отримано досить непогані показники об'єктивності виконання діагностики поточного технічного стану ізоляції при співпадінні отриманих результатів з еталоном 93,46%.

Наукова новизна полягає у розробці

математичної моделі системи постійного контролю діагностичних параметрів і проведення діагностики поточного стану ізоляції трансформаторних підстанцій із застосуванням мереж Петрі, які спрямовані підвищити їх надійність експлуатації та об'єктивність визначення пошкоджень виткової і міжфазної ізоляції, що мають значний вплив на працездатність обладнання.

Практична значимість полягає у підвищенні ефективності виконання організації технічного обслуговування за фактичним технічним станом і об'єктивності його визначення з одержанням залишкового ресурсу роботи електрообладнання та надійності експлуатації самого обладнання на промислових підприємствах. Розроблено модель системи контролю діагностичних показників і проведення діагностики ізоляції трансформаторних підстанцій та отримано її математичний опис і програмну реалізацію зазначеного алгоритму задля розв'язування складних завдань визначення поточного технічного стану ізоляції із застосуванням мереж Петрі.

Список літератури

1. Zhao Z., Xu Q. S., Jia M. P. Improved shuffled frog leaping algorithm-based BP neural network and its application in bearing early fault diagnosis: Neural Computing and Applications, 2016, 27(2), P.375-385.
2. Guo X. J., Chen L., Shen C. Q. Hierarchical adaptive deep convolution neural network and its application to bearing fault diagnosis: Measurement, 2016, 93, P.490-502.
3. Zheng J., Cheng J., Yang Y. A rolling bearing fault diagnosis approach based on LCD and fuzzy entropy. Mechanism and Machine Theory, 2013, 70, P.441-453.
4. Kar S., Das S., Ghosh P. K. Applications of neuro fuzzy systems: A brief review and future outline: Applied Soft Computing, 2014, 15, P.243-259.
5. Huang G. B., Zhu Q. Y., Siew. C. Extreme learning machine: Theory and applications. Neurocomputing, 2006, 70(1), P.489-501.
6. Yang Z. X., Wang X. B., Zhong J. H. Representational Learning for Fault Diagnosis of Wind Turbine Equipment: A Multi-Layered Extreme Learning Machines Approach. Energies, 2016, 9(6), P.379.
7. Wei Y., Minqiang X., Yongbo L., et al. Gearbox fault diagnosis based on local mean decomposition, permutation entropy and extreme learning machine: Journal of Vibroengineering, 2016, 18(3), P.1459-1473.
8. Ханова А.А., Мунтянова А.А., Аверьянова К.И. Моделирование конфигурации сложных систем на основе сетей Петри. Научный вестник НГТУ том 71, № 2, 2018. С. 39-58. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-2-39-58
9. Новикова Е.И. Анализ и алгоритмизация процесса диагностики острого панкреатита на основе имитационного моделирования. Вестник ВГТУ. Том 7, №1, 2011. С. 117-120
10. Алтухова Т.В., Дмитрієва О.А. Дослідження технічного стану електродвигунів на основі мереж Петрі. Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання, № 2(4), 2020. С. 104-116. <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2020.02.01>.
11. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1992. 240 с.
12. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие/ А. И. Халысмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, Д. А. Глушков Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 64 с.
13. Попов Г.В. Вопросы диагностики силовых трансформаторов: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет». Иваново, 2012. 172 с.
14. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в трансформаторном масле. – М, 2001. – 42 с.

15. ГОСТ 11677-85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия. URL: <http://www.vashdom.ru/gost/11677-85/>.

References

1. Zhao, Z., Xu, Q. S., Jia, M. P. (2016), "Improved shuffled frog leaping algorithm-based BP neural network and its application in bearing early fault diagnosis" *Neural Computing and Applications*, 27(2), pp. 375-385.
2. Guo, X. J., Chen, L., Shen, C. Q. (2016), "Hierarchical adaptive deep convolution neural network and its application to bearing fault diagnosis" *Measurement*, 93, pp. 490-502.
3. Zheng, J., Cheng, J., Yang, Y. (2013), "A rolling bearing fault diagnosis approach based on LCD and fuzzy entropy" *Mechanism and Machine Theory*, 70, pp. 441-453.
4. Kar, S., Das, S., Ghosh, P. K. (2014), "Applications of neuro fuzzy systems: A brief review and future outline" *Applied Soft Computing*, 15, pp. 243-259.
5. Huang, G.B., Zhu, Q. Y., Siew, C. (2006), "Extreme learning machine: Theory and applications" *Neurocomputing*, 70(1), pp. 489-501.
6. Yang, Z. X., Wang, X. B., Zhong, J. H. (2016), "Representational Learning for Fault Diagnosis of Wind Turbine Equipment: A Multi-Layered Extreme Learning Machines Approach", *Energies*, 9(6), pp. 379.
7. Wei, Y., Minqiang, X., Yongbo, L., et al. (2016), "Gearbox fault diagnosis based on local mean decomposition, permutation entropy and extreme learning machine", *Journal of Vibroengineering*, 18(3), pp. 1459-1473.
8. Khanova, A.A., Muntyanova, A.A., Averyanova, K.I. (2018), "Modeling the configuration of complex systems based on Petri nets" *Scientific Bulletin of NSTU*, [Doslidzhennia tekhnichnoho stanu elektrodvyhuniv na osnovi merezh Petri. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: In-formatyka ta modeliuвання] vol. 71, No. 2, pp. 39-58. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-2-39-58.
9. Novikova, E.I. (2011), "Analysis and algorithmization of the process of diagnosing acute pancreatitis based on simulation" *Bulletin of VSTU*, [Analiz y alhorytmizatsiya protsessa dyahnostyky ostroho pankreatyta na osnove ymytatsyonnoho mo-delyrovannya. Vestnyk VHTU.] Vol 7, No. 1, pp. 117-120.
10. Altukhova, T., Dmitrieva, O. (2020), "Research of technical state of electric motors based on petri nets" *Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling"*, [Doslidzhennia tekhnichnoho stanu elektrodvyhuniv na osnovi merezh Petri. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: In-formatyka ta modeliuвання] No. 2(4), pp. 104-116. <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2020.02.01>.
11. Svi, P. M. (1992), "Methods and means of diagnosing high voltage equipment" *Energoatomizdat*, 240 p.
12. Khalyasmaa, A. I., Dmitriev, S. A., Kokin, S. E., Glushkov, D. A. (2015), "Diagnostics of electrical equipment of power stations and substations: textbook" *Ural Publishing House* [Dyahnostyka elektrooborudovannya elektricheskikh stantsiy y podstantsiy: uchebnoe posobie]. un-ty, Yekaterinburg, 64 p.
13. Popov, G.V. (2012), "Issues of diagnostics of power transformers" *FGBOUVPO "Ivanovo State Power Engineering University"* [Voprosi dyahnostyky sylovukh transformatorov. FHBOUVPO «Yvanovskiy gosudarstvennyi enerhe-tycheskiy unyversytet»], 172 p.
14. RD 153-34.0-46.302-00 (2001), "Guidelines for the diagnosis of developing defects in transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in transformer oil", Moscow, 42 p.
15. GOST 11677-85 Power transformers. General specifications [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.vashdom.ru/gost/11677-85/>

Надійшла до редакції 22.10.2021

T. ALTUKHOVA

Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine
tetiana.altukhova@donntu.edu.ua

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF TRANSFORMER INSULATION USING PETRI NETS

In this paper, we have expanded the possibilities of using Petri nets for modeling the process of technical diagnostics. A structural and mathematical model of a system for monitoring diagnostic signs and diagnosing the current state of insulation of transformer substations is proposed, which will allow monitoring the technical condition provided that the parameter values are close to the limit indicators, which, in turn, will classify the results obtained into three classes: normal operation, damage to the turn and interphase insulation of transformer substations.

Verification of the obtained results of the implementation of the presented model was carried out and it was found that the diagnostics of the current state of the insulation of these transformers was performed quite effectively with constant monitoring of certain diagnostic parameters with an average absolute deviation rate within 6.19-7.11%, however, in the case when the value of the maximum the deviation indicator during implementation will be more than $\pm 11\%$, then it becomes necessary to take into account additional parameters that affect the quality of the maintenance process and operation of electrical equipment in the future, for example, the

design of transformers and unfavorable conditions for their operation. The analysis of the implementation results made it possible to determine the quality of the developed model, which was controlled by two indicators, namely, the time of the diagnostics, which averaged 0.024 sec., and a fairly good agreement between the results of its implementation with the standard (93.46%), which led to its recommendation when monitoring the current state of the insulation of transformer substations. Also, the software implementation of the obtained model will provide real-time monitoring of diagnostic indicators and will allow determining the residual life of transformers in the event of a possible damage to the turn and interphase insulation more efficiently by about 20% of possible analogues, thereby ensuring a reduction in the number of occurrences of uncontrolled emergencies and a decrease in hourly, material and energy losses.

Keywords: *mathematical model, diagnostics of the current state, diagnostic parameters, isolation, transformer substation, classification scheme, Petri nets.*