

Т.В. Алтухова, к.т.н., доцент  
Донецький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна  
tetiana.altukhova@donntu.edu.ua

## Математичне обґрунтування впливу діагностичних ознак на технічний стан міжфазної ізоляції електродвигунів

*В даній науковій роботі виконано дослідження негативного впливу діагностичних ознак на технічний стан міжфазної ізоляції електродвигунів. Розроблено комп'ютерну модель для визначення залежностей між струмом витоку крізь міжфазну ізоляцію і струмами фаз. Проведено обчислювальний експеримент, де було встановлено, що пошкодження міжфазної ізоляції надійно корелюють з різницями між струмами фаз, проте не з самими струмами. Отримані значення коефіцієнту кореляції показали, що між опором ізоляції та різницею струмів фаз електродвигунів є взаємозв'язок, тим самим підтверджуючи гіпотезу наявності впливу визначених факторів на технічний стан міжфазної ізоляції. Визначено, що ймовірність появи таких пошкоджень при наявності різниці фазних струмів в електродвигунах через відповідні чинники складає 33%. Отримані результати дослідження можуть використовуватися при розробці моделей систем діагностики за умови контролю стану і профілактики пошкоджень ізоляції та запобігання аварійних ситуацій, що пов'язані з її порушеннями.*

**Ключові слова:** комп'ютерна модель, коефіцієнт кореляції, критерій Стьюдента, міжфазна ізоляція, пошкодження, діагностичні параметри, електродвигун

**DOI:** 10.31474/1996-1588-2023-1-36-30-35

### Вступ

Сьогоднішній розвиток промислових підприємств передбачає використання більш сучасного електромеханічного обладнання (ЕМО), проте їх більшість застосовує на своєму виробництві ЕМО, яке знаходиться в роботі вже понад 15 років і термін експлуатації за технічним паспортом вже майже або повністю вийшов, і, зазвичай, його технічний стан є незадовільним. Однак відповідно до Правил технічної експлуатації [1] таке обладнання повинно відповідати всім вимогам, до яких насамперед відносять його надійність та ефективність при експлуатації, на які негативно впливають як природні фактори, так і експлуатаційні. І з огляду на це виникає необхідність в проведенні досліджень в технічній діагностики стану електрообладнання з виявленням ймовірних пошкоджень і дефектів в ньому з урахуванням на ранньої стадії їх розвитку та визначенням залишкового ресурсу ЕМО [2].

Ефективним способом визначення ймовірних пошкоджень і дефектів в ЕМО є виявлення всіх можливих ознак і чинників, які негативно впливають на технічний стан, та проаналізувати існуючі засоби захисту від ймовірних наслідків їх появи [3].

На даний час існує три напрямки проведення поточного контролю технічного стану і діагностики електрообладнання, до яких відносять параметричну, превентивну діагностики

та діагностику пошкоджень, що спрямовані, головним чином, на виявлення існуючих причин і наслідків виникнення негативних аномалій і забезпечення відповідних заходів для попередження виходу з ладу обладнання з урахуванням зібраної інформації за минулий і поточний стан електрообладнання [4]. Всі три напрямки передбачають декілька етапів [5-7]:

– визначення ймовірних ознак впливу на технічний стан ЕМО;

– проведення діагностики електрообладнання з виявлення пошкоджень і дефектів;

– прогнозування поточного технічного стану ЕМО з отриманням його залишкового ресурсу експлуатації.

Надалі, в якості прикладу, будуть розглядатися електродвигуни (ЕД), як більш вразливе електрообладнання на промислових підприємствах. На рис. 1 відображені більш відомі пошкодження і дефекти та ймовірні причини їх виникнення в електродвигунах [2, 3, 5].

З огляду на рис. 1 існує доволі багато методів та засобів визначення пошкоджень в електродвигунах, прикладами є діагностика пошкоджень підшипників обертових машин на основі дослідження вібрацій з використанням штучних нейронних мереж [8] та вейвлет-перетворень [9]; визначення несправності статора трифазного синхронного двигуна із застосуванням спектрального аналізу і нейро-нечіткої логіки [10]; діагностика пошкоджень індукційних ЕД за умови

енергетичної оцінки їх деталей при появі короткого замикання на основі вейвлет-перетворень [11]; діагностика ЕД на наявність пошкоджень вимикачів при зміні струму в роторі і відповідної напруги [12]; визначення пошкоджень ротора із використанням вібраційних сигналів [13,14]; діагностика ізоляції синхронних ЕД та генератор-двигунів за умови безпосереднього контролю параметрів розподіленого струму [15], різниці вимірювальних струмів статора [16] та часткових розрядів [17]. В даних методах зовсім не розглядається питання впливу зсуву фаз струмів та напруги в електродвигунах і їх ймовірне спотворення у часі та появи пошкоджень в міжфазній ізоляції, тому, з огляду на це, визначення впливу на появу ймовірних пошкоджень через ці ознаки є досить актуальним питанням.

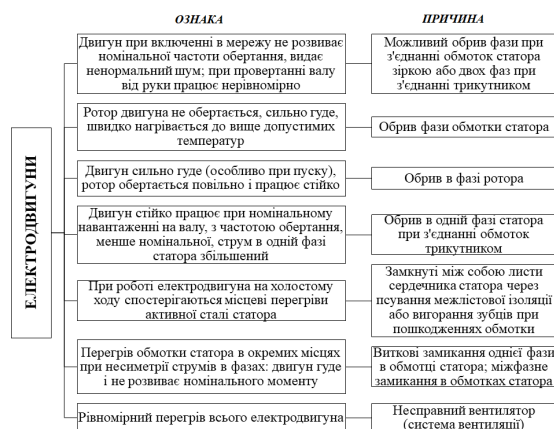


Рисунок 1 – Відомі пошкодження і дефекти та ймовірні причини їх виникнення в ЕД

Таким чином, **головна мета** даної роботи є дослідження та обґрунтування впливу параметрів струму на появу пошкоджень в міжфазній ізоляції електродвигунів за допомогою статистичних методів вимірювання зв'язку.

**Основне завдання дослідження** – встановлення ймовірного негативного впливу параметрів струму на технічний стан міжфазної ізоляції електродвигунів задля подальшої організації проведення діагностики електрообладнання.

### Обґрунтування методики визначення впливу діагностичних ознак на стан міжфазної ізоляції

Сучасні відомі засоби моніторингу та діагностики виконані на основі сприймання функціонального зв'язку пошкоджень і дефектів та їх причин виникнення за умов змін параметрів, що вимірюються. Прикладом таких засобів можна вважати максимальне реле, що здійснює контроль зміні струму в електромеханічному обладнанні з урахуванням заданого діапазону його значень.

При виникненні пошкоджень в електродвигунах значення вимірюваних параметрів зазвичай змінюється у відповідних межах відповідно статистичного закону, що характеризує взаємозв'язок між ними. Як окремий випадок даного зв'язку можна розглядати саме функціональний зв'язок, який характеризує відповідність між значеннями одного параметру та показниками іншого. Прикладом є відповідність показникам опору ізоляції середнім показникам струму, що подається від джерела електроживлення, проте, як окремий випадок, показники ознак можуть приймати безліч значень з різними ймовірностями їх появи [18].

Одним з методів вважається визначення парної кореляції поміж двох показників з урахуванням лише одного фактору впливу на варіацію результативної ознаки. В нашому випадку виконання дослідження ґрунтується на визначенні кореляційного зв'язку між струмом і напругою фаз статора ЕД та опорамі міжфазної ізоляції.

З огляду на це, висунута нульова гіпотеза  $H_0$  щодо відсутності наявного впливу певного фактору за умов множини спостережень  $y_i, i = 1, 2, \dots, m$  на отриману вибірку сукупність значень  $x_i, i = 1, 2, \dots, m$  діагностичного показника, однак альтернативою є гіпотеза  $H_1$ , яка дозволяє стверджувати, що вплив визначеного фактору на даний показник є досить вагомим з урахуванням рівня значущості  $\alpha = 0,01$  [19]:

$$H_0: r_{xy} = 0, \quad (1)$$

$$H_1: r_{xy} \neq 0, \quad (2)$$

де  $r_{xy}$  – коефіцієнт кореляції між значеннями діагностичного показника та фактору впливу [19]:

$$r_{xy} = \frac{K_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (3)$$

$x$  і  $y$  – значення показників, між якими виконується пошук кореляційного зв'язку;

$K_{xy}$  – кореляційний момент,

$\sigma_x$  і  $\sigma_y$  – відповідають значенням середніх квадратичних відхилень показника і фактору впливу.

Перевірка висунутої гіпотези здійснюється за умови перевірки його значущості з використанням  $t$ -критерія Стьюдента через суттєвість величини коефіцієнту кореляції та її підтвердження чи спростування визначається згідно наступної вимоги [19]:

$$|z^*| < t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n), \quad (4)$$

$n$  – відповідає числу ступенів свободи,  $n = m - 2$ ,  $m$  – загальний обсяг визначеної вибіркової сукупності,

$t_{1-\frac{\alpha}{2}}$  – квантіль розподілу Стьюдента на рівні значущості  $\alpha$ ,

$z^*$  – вибіркова статистика критерію на відповідних емпіричних даних [18]:

$$z^* = \frac{r \cdot \sqrt{n}}{\sqrt{1-r^2}}. \quad (5)$$

### Дослідження впливу діагностичних ознак на стан міжфазної ізоляції ЕД

Визначення ймовірних залежностей між струмом і напругою фаз статора ЕД та опором міжфазної ізоляції здійснювалося на основі обчислювального експерименту за наступною технологією:

– побудовано схему роботи електродвигуна із застосуванням узагальненої математичної моделі (6) згідно [20]:

$$\begin{cases} \vec{u}_s = r_s \cdot \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot \vec{\psi}_s \\ \vec{u}_R = r_R \cdot \vec{i}_R + \frac{d\vec{\psi}_R}{dt} + j \cdot (\alpha_k - p \cdot v) \cdot \vec{\psi}_R \\ \vec{\psi}_s = x_s \cdot \vec{i}_s + x_m \cdot \vec{i}_R \\ \vec{\psi}_R = x_m \cdot \vec{i}_s + x_R \cdot \vec{i}_R \\ m = k \cdot \text{Mod}(\vec{\psi}_l \times \vec{i}_k) \\ T_m \frac{dv}{dt} = m - m_H \end{cases}, \quad (6)$$

де  $\vec{u}, \vec{i}, \vec{\psi}$  – відносні електромагнітні змінні стану;  
 $\alpha_k, v$  – відносні параметри частоти статора та швидкості ротора відповідно;  
 $m$  – відносний момент на валу електродвигуна;  
 $r_s, r_R, x_s, x_m, x_R, T_m$  – відносні параметри моделі [20].

Однак, в нашому випадку використовується віртуальна модель електродвигуна, яка базується на математичній моделі (6) та представлена відповідним блоком в програмі Matlab – Simulink.

- задіяні контролюючі прилади;
- виконано вимірювання струмів фаз і струму витoku при різних навантаженнях та різних опорах ізоляції;
- результати вимірювань оброблені відповідним чином для визначення статистичних зв'язків.

На рис. 2 представлена комп'ютерна модель дослідження, яка складається з джерела трифазної напруги, ЕД, резисторів, які є аналогом ізоляції між фазами статора електродвигуна, а також до схеми підключені амперметри та осцилограф задля отримання вимірів та спостереження за механічними параметрами, такими як частота обертання і момент. Під час моделювання здійснювали зміну опору резисторів та виконувалася реєстрація значень діючих струмів фаз і струму витoku.

Дослідження забезпечувалося при наявності кількох навантажень. Вимірювання на комп'ютерній моделі здійснювалося за умови декількох навантажень, де визначено, що

залежність струмів фаз від навантаження є більш значущою, ніж залежність від опору ізоляції.

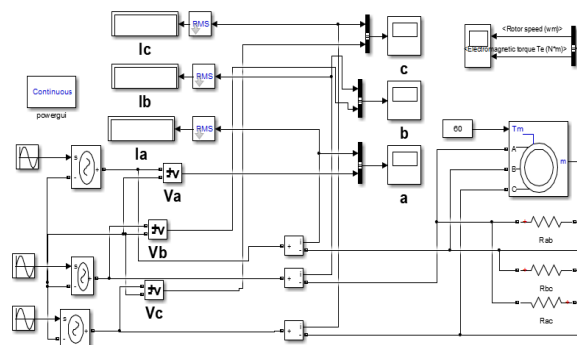


Рисунок 2 – Модель дослідження

Внаслідок чого було припущено, що залежність від навантаження може бути усунена, якщо визначити залежність струму витoku від різниці між струмами фаз. На рис. 3 представлені отримані результати зміни струмів фаз в залежності від опору міжфазної ізоляції ЕД та на рис. 4 зображена залежність різниці струмів між фазами від струму витoku.

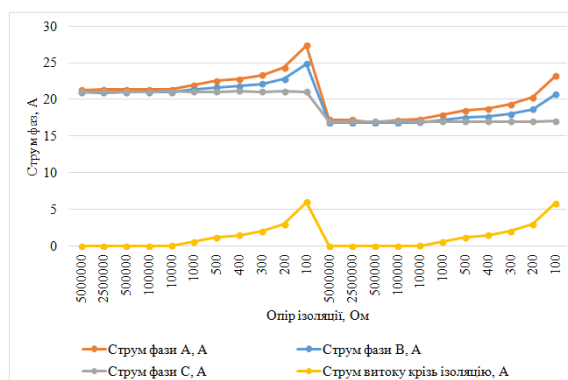


Рисунок 3 – Результати дослідження зміни струмів при визначенні впливу опору ізоляції між фазами

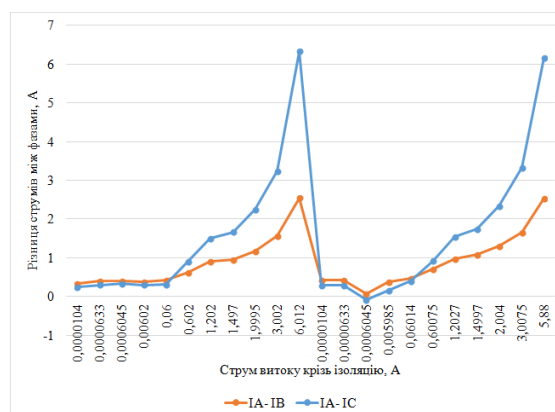


Рисунок 4 – Залежність різниці струмів між фазами від струму витoku

Згідно отриманих результатів виконано перевірку висунутої нульової гіпотези  $H_0$  щодо

відсутності впливу виявлених факторів на появу пошкодження міжфазної ізоляції за умови рівня значущості  $\alpha = 0,01$  згідно (1)-(5). Результати дослідження впливу діагностичних ознак на поточний стан міжфазної ізоляції електродвигунів наведені у табл. 1.

Отримані результати, що наведені в табл. 1, показують, що висунута гіпотеза  $H_0$  щодо відсутності впливу виявлених факторів на міжфазну ізоляцію в електродвигунах не підтверджена, так як умова  $|z^*| < t_{1-\frac{\alpha}{2}}(m-2)$  не виконується через те, що вибіркове значення статистики значно перевищує квантіль розподілу  $t$  критерія Стюдента при рівні значущості  $\alpha = 0,01$ . Дана обставина свідчить, що струм витоку крізь ізоляцію між фазами двигуна корелює з різницями струмів фаз А і В та А і С та дозволяє підтвердити виникнення порушення міжфазної ізоляції в електродвигунах.

Таблиця 1 – Результати обчислення критичних значень коефіцієнтів кореляції

| Показник                                                     | Умове позначення | $\Gamma_{A-B}$ | $\Gamma_{A-C}$ |
|--------------------------------------------------------------|------------------|----------------|----------------|
| коефіцієнт кореляції                                         | $r$              | 0,989          | 0,9987         |
| вибіркове значення статистики                                | $z^*$            | 29,9           | 87,62          |
| квантіль розподілу $t$ критерія Стюдента ( $\alpha = 0,01$ ) | $t$              | 2,85           | 2,85           |
| прийняття гіпотези $H_0$ : $r=0$                             | так/ні           | ні             | ні             |

Враховуючи, що з дефектом ізоляції між фазами корелює різниця струмів фаз, проте вона може виникнути через кілька чинників, так що сама по собі різниця між струмами фаз свідчить про дефект ізоляції між фазами з якоюсь вірогідністю. З огляду на це, дана ймовірність буде визначатися як відношення одиниці до кількості можливих чинників різниці між струмами фаз, до

яких відносять появи різниці напруг в системі живлення; появи самого дефекту ізоляції між фазами ЕД; виникнення виткового замикання в однієї фазі електродвигуна. Таким чином, вірогідність появи різниці між струмами фаз, обумовлена пошкодженням міжфазної ізоляції ЕД дорівнює:

$$P\left(\frac{\Delta I}{R_{I3M\phi}}\right) = \frac{N_{I3M\phi}}{\sum_{i=1}^n N_{\Delta I}} = 0,33, \quad (7)$$

$P\left(\frac{\Delta I}{R_{I3M\phi}}\right)$  – ймовірність виникнення різниці струмів фаз електродвигуна, що обумовлена зниженням міжфазної ізоляції;

$N_{I3M\phi}$  – кількість чинників, за якими ведеться діагностика, в нашому випадку діагностується дефект міжфазної ізоляції;

$N_{I3M\phi}$  – загальна кількість чинників, що призводять до різниці струмів фаз в електродвигуні.

## Висновки

Виконано розробку комп'ютерної моделі для визначення залежностей між струмом витоку крізь міжфазну ізоляцію і струмами фаз. Проведено кореляційний аналіз факторів, що впливають на появу дефектів міжфазної ізоляції, та визначено, що пошкодження міжфазної ізоляції досить надійно корелюють з різницями між струмами фаз, проте не з самими струмами. Також отримані показники коефіцієнту кореляції (табл. 1) показали, що між опором ізоляції та різницею струмів фаз електродвигунів є функціональний зв'язок, тим самим підтверджуючи гіпотезу наявності впливу визначених факторів на технічний стан міжфазної ізоляції. Виявлено, що ймовірність появи пошкоджень міжфазної ізоляції при наявності різниці фазних струмів в електродвигунах через відповідні чинники складає 33%. Отримані результати можуть використовуватися при розробці моделей систем діагностики за умови контролю стану і профілактики пошкоджень ізоляції та запобігання аварійних ситуацій, що пов'язані з її порушеннями.

## Список літератури

- Правила технічної експлуатації електроустановок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text>
- Пучков Л.О., Ляхомський О.В., Плащанський Л.О., Чеботаєв М.І., Щуцький В.І., Півняк Г.Г., Шкрабець Ф.П., Заїка В.Т., Разумний Ю.Т., Рибалко А.Я. Електрифікація гірничого виробництва. Підручник для ВНЗ: у 2-х т. Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т, 2010. Т. 1. 503 с.
- Алтухова Т.В., Петелін Е.А. Визначення діагностичних параметрів виткової ізоляції шахтних двигунів. Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». № 1(32) 2019. С.114-120. DOI: 10.31474/2075-4272-2019-1-32-114-120
- Алтухова Т.В. Моделювання діагностичних ознак міжфазної ізоляції електродвигунів гірничих машин та визначення ймовірності їх виникнення. Journal of science. Lyon, VOL. 1, No7, 2020. С. 53-57.
- Казак В.М., Доценко Б.І., Кузьмін В.П. Надійність та діагностика електрообладнання: навч. посіб. К.: НАУ, 2013. 280 с.
- Kan M. S., Tan A. C. C., Mathew J. A review on prognostic techniques for non-stationary and non-linear rotating

- systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 62–63, 2015. P. 1-20. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.02.016>
7. Gao Z. W., Cecati C., Ding S. X. A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques Part I: Fault Diagnosis with Model-Based and Signal-Based Approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6), 2015. P. 3757-3767. DOI:10.1109/TIE.2015.2417501
8. Li H., Huang J., Ji Sh. Bearing Fault Diagnosis with a Feature Fusion Method Based on an Ensemble Convolutional Neural Network and Deep Neural Network. *Sensors*, 19 (9), 2019. P. 1-18. DOI:10.3390/s19092034
9. Cui L. L., Ma C. Q., Zhang F. B., et al. Quantitative diagnosis of fault severity trend of rolling element bearings. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 28(6), 2015. P. 1254-1260. URL: <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0715.094H>
10. Ammar A. B., Gritli Y., Benrejeb M. Diagnosis of Stator Asymmetry in Permanent Magnet Synchronous Motors Using Negative Sequence Current. *Studies in Informatics and Control*, 27(2), 2018. P. 165-174. URL: <https://doi.org/10.24846/v27i2y201804>
11. Benchabane F., Guettaf A., K. Yahia, et al. Experimental investigation on induction motors inter-turns short-circuit and broken rotor bars faults diagnosis through the discrete wavelet transform Network. *Elektrotech. Inftech.*, 135, 2018. P. 187–194. URL: <https://doi.org/10.1007/s00502-018-0607-6>
12. Anto J., Thanga Raj Chelliah, Raghu Selvaraj, Kyo-Beum Lee. Fault diagnosis and fault-tolerant control of megawatt power electronic converter-fed large-rated asynchronous hydrogenerator. *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 7, Issue 4, 2019. P.2403-2416. DOI: 10.1109/JESTPE.2018.2881427
13. Lu N., Xiao Z. H., Malik O. P. Feature extraction using adaptive multiwavelets and synthetic detection index for rotor fault diagnosis of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 52–53, 2015. P. 393–415. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.07.024>
14. Lu N., Zhang G., Xiao Zh. Malik Om P. Feature Extraction Based on Adaptive Multiwavelets and LTSA for Rotating Machinery Fault Diagnosis. *Shock and Vibration*, vol. 2019, 2019. P. 1-16. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/1201084>
15. Kononenko A.I. Assessment of the State of Electrical Insulation by Measuring Isothermal Relaxation Current. *Power Technol. Eng.*, 52, 2018. P. 95–101. URL: <https://doi.org/10.1007/s10749-018-0916-2>
16. Mazzeletti M. A., Bossio G. R., De Angelo C. H., Espinoza-Trejo D. R. A Model-Based Strategy for Interturn Short-Circuit Fault Diagnosis in PMSM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(9), 2017. P. 7218 – 7228. DOI:10.1109/TIE.2017.2688973
17. Lee S., Kong T., Kim H. Analysis of Insulation Diagnosis for Generator-Motor Stator Winding in Pumped Storage Power Plant. *J. Electr. Eng. Technol.* 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00385-x>
18. Алтухова Т.В. Комп'ютерне моделювання систем діагностики технічного стану електродвигунів гірничих машин: автореф. дис. канд. техн. наук. Покровськ, 2021. 28 с.
19. Кислий В.М. Організація наукових досліджень: навчальний посібник. Суми: Університетська книга, 2011. 224 с.
20. Щокін В.П., Федосов Б.Т., Чорний С.Г., Івановська О.В., Жиленков А.О. Моделювання електромеханічних систем: навчальний посібник. К.: Кондор-Видавництво, 2018. 204 с.

### References

1. Rules of technical operation of electrical installations [Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii elektroustanovok], available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text>
2. Puchkov, L.O., Lyakhomskiy, O.V., Plachanskyi, L.O., Chebotaev, M.I., Shchutskiy, V.I., Pivnyak, G.G., Shkrabets, F.P., Zayka, V.T., Razumnyi, Y.T., Rybalko, A.Ya. (2010), Electrification of mining production. Textbook for universities: in the 2nd volume [Elektryfikatsiia hirnychoho vyrobnytstva. Pidruchnyk dlia VNZ: u 2-kh t.], Dnipropetrovsk: NMU. V. 1., 503 p.
3. Altukhova, T., Petelin, E. (2019), "Determination of diagnostic parameters of winding isolation of mine engines" [Vyznachennia diahnostychnykh parametriv vytkovoi izoliatsii shakhtnykh dyvnyuniv], *Scientific works of DonNTU. Series: "Computer technology and automation"*, No 1(32), pp. 114-120, DOI: 10.31474/2075-4272-2019-1-32-114-120
4. Altukhova, T. (2020), "Modeling of diagnostic signs of interphase isolation of electric motors of mining machines and determination of probability of their emergence" [Modeliuvannia diahnostychnykh oznak mizhfaznoi izoliatsii elektrodyvnyuniv hirnychykh mashyn ta vyznachennia ymovirnosti yikh vynyknennia], *Journal of science. Lyon*, VOL.1, No7, pp. 53-57.
5. Kazak, V.M., Dotsenko, B.I., Kuzmin, V.P. (2013), "Reliability and diagnostics of electrical equipment: training. manual" [Nadiinist ta diahnostyka elektroobladnannia: navch. posib.], K.: NAU, 280 p.
6. Kan, M. S., Tan, A. C. C., Mathew, J. (2015), "A review on prognostic techniques for non-stationary and non-linear rotating systems". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 62–63 pp. 1-20, available at:

<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.02.016>

7. Gao, Z. W., Cecati, C., Ding, S. X. (2015), "A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques Part I: Fault Diagnosis with Model-Based and Signal-Based Approaches", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6), pp. 3757-3767, DOI:10.1109/TIE.2015.2417501
8. Li, H., Huang, J., Ji, Sh. (2019), "Bearing Fault Diagnosis with a Feature Fusion Method Based on an Ensemble Convolutional Neural Network and Deep Neural Network", *Sensors*, 19 (9), pp. 1-18, DOI:10.3390/s19092034
9. Cui, L. L., Ma, C. Q., 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, available at: <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0715.094H>
10. Ammar, A. B., Gritli, Y., Benrejeb, M. (2018), "Diagnosis of Stator Asymmetry in Permanent Magnet Synchronous Motors Using Negative Sequence Current", *Studies in Informatics and Control*, 27(2), pp. 165-174, available at: <https://doi.org/10.24846/v27i2y201804>
11. Benchabane, F., Guettaf, A., Yahia, K. et al. (2018), "Experimental investigation on induction motors interturns short-circuit and broken rotor bars faults diagnosis through the discrete wavelet transform Network", *Elektrotech. Inftech.*, 135, pp. 187-194, available at: <https://doi.org/10.1007/s00502-018-0607-6>
12. Anto, J., Thanga Raj Chelliah, Raghu Selvaraj, Kyo-Beum Lee (2019), "Fault diagnosis and fault-tolerant control of megawatt power electronic converter-fed large-rated asynchronous hydrogenator". *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 7, Issue 4, pp. 2403-2416, DOI: 10.1109/JESTPE.2018.2881427
13. Lu, N., Xiao, Z. H., Malik, O. P. (2015), "Feature extraction using adaptive multiwavelets and synthetic detection index for rotor fault diagnosis of rotating machinery", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 52-53, pp. 393-415, available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.07.024>
14. Lu, N., Zhang, G., Xiao, Z. H., Malik, O. P. (2019), "Feature Extraction Based on Adaptive Multiwavelets and LTSA for Rotating Machinery Fault Diagnosis". *Shock and Vibration*, vol. 2019, pp. 1-16, available at: <https://doi.org/10.1155/2019/1201084>
15. Kononenko, A.I. (2018), "Assessment of the State of Electrical Insulation by Measuring Isothermal Relaxation Current", *Power Technol. Eng.*, 52, pp. 95-101, available at: <https://doi.org/10.1007/s10749-018-0916-2>
16. Mazzeletti, M. A., Bossio, G. R., De Angelo, C. H., Espinoza-Trejo, D. R. (2017), "A Model-Based Strategy for Interturn Short-Circuit Fault Diagnosis in PMSM". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(9), pp. 7218-7228, DOI:10.1109/TIE.2017.2688973
17. Lee, S., Kong, T., Kim, H. (2020), "Analysis of Insulation Diagnosis for Generator-Motor Stator Winding in Pumped Storage Power Plant", *J. Electr. Eng. Technol.*, available at: <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00385-x>
18. Altukhova, T.V. (2021), "Computer modeling of systems for diagnosing the technical condition of electric motors of mining machines: Author's thesis [Kompiuterne modeluvannia system diahnozyky tekhnichnoho stanu elektrodvyhunyiv hirnychyykh mashyn: avtooref. dis. kand. tekhn. nauk.], Pokrovsk, 28 p.
19. Kisly, V.M. (2011), "Organization of scientific research: study guide" [Orhanizatsiia naukovykh doslidzhen: navchalnyi posibnyk], Sumy: University book, 224 p.
20. Shchokin, V.P., Fedosov, B.T., Chorny, S.G., Ivanovska, O.V., Zhilenkov, A.O. (2018), "Modeling of electromechanical systems: tutorial" [Modeluvannia elektromekhanichnykh system: navchalnyi posibnyk], K.: Condor Publishing House, 204 p.

Надійшла до редакції 28.07.2022

## T. ALTUKHOVA

Donetsk National Technical University, Luts'k, Ukraine  
tetiana.altukhova@donntu.edu.ua

## MATHEMATICAL SUBSTANTIATION OF THE INFLUENCE OF DIAGNOSTIC SIGNS ON THE TECHNICAL CONDITION OF THE INTERPHASE INSULATION OF ELECTRIC MOTORS

In this scientific work, a study of the negative impact of diagnostic signs on the technical condition of the interphase insulation of electric motors was performed. A computer model was developed to determine the relationship between the leakage current through the interphase insulation and the phase currents. A computational experiment was conducted, where it was established that the damage to the interphase insulation reliably correlates with the differences between the phase currents, but not with the currents themselves. The obtained values of the correlation coefficient showed that there is a functional relationship between the insulation resistance and the difference in the phase currents of the electric motors, thus confirming the hypothesis of the influence of certain factors on the technical condition of the interphase insulation. It was determined that the probability of such damage occurring in the presence of a difference in phase currents in electric motors due to relevant factors is 33%. The obtained research results can be used in the development of models of diagnostic systems under the condition of monitoring the condition and prevention of insulation damage and prevention of emergency situations associated with its violations.

**Keywords:** computer model, correlation coefficient, Student's criterion, interphase insulation, damage, diagnostic parameters, electric motor