

Грабко Валентин Володимирович, к.т.н., доц., доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, +38(067)262-04-02, vgrabko@gmail.com

Вінницький національний технічний університет

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021

Ощепков Віктор Сергійович, аспірант кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, +38(097)396-94-52, viti113555@gmail.com

Вінницький національний технічний університет

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021

ПРО ОДИН ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ВИДУ ПОШКОДЖЕННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТОК ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Анотація. На підставі проведеного аналізу в роботі сформульовано підхід до визначення місць пошкодження ізоляції провідника обмотки, що знаходиться в пазу електричної машини, в двох і більше точках. Математичною моделлю передбачається за вимірними значеннями температури в лобових частинах обмотки знаходження потенційних двох або більше місць пошкодження ізоляції провідника, що знаходиться в пазу електричної машини. Для цього необхідно з кожного боку зазначеного провідника здійснити по два вимірювання температури – на краях провідника та на деякій відстані від крайніх точок наскільки це допустимо, виходячи з конструкції електричної машини. Відповідно до графічної інтерпретації задачі - якщо прямі лінії, проведені через точки вимірювання температури перетинаються за межами допустимих значень температури, то в даному провіднику має місце не менше двох точок з погіршеною ізоляцією. Розроблено алгоритм визначення місць можливого пошкодження ізоляції. Здійснена мікропроцесорна реалізація розробленої математичної моделі, яка в поєднанні з пристроєм вимірювання температури дозволить здійснити практичну реалізацію представленого підходу.

Ключові слова: електрична машина, ізоляція провідника обмотки, подвійне пошкодження ізоляції, математична модель, алгоритм роботи.

Grabko Valentyn, PhD, Docent, Docent of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, +38(067)262-04-02, vgrabko@gmail.com

Vinnitsia National Technical University

95 Khmelnytske shose, Vinnytsia, 21021

Oshchepkov Victor, Postgraduate Student of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, +38(097)396-94-52, viti113555@gmail.com

Vinnitsia National Technical University

95 Khmelnytske shose, Vinnytsia, 21021

ON ONE APPROACH TO ASSESSING THE TYPE OF DAMAGE TO THE INSULATION OF THE WINDINGS OF POWERFUL ELECTRICAL MACHINES

Abstract. *Based on the analysis conducted in the work, an approach to determining the locations of damage to the insulation of the winding conductor located in the groove of the electric machine at two or more points is formulated. The mathematical model assumes, based on the measured temperature values in the frontal parts of the winding, the location of potential two or more locations of damage to the insulation of the conductor located in the groove of the electric machine. For this, it is necessary to carry out two temperature measurements on each side of the specified conductor - at the edges of the conductor and at a certain distance from the extreme points as much as is permissible, based on the design of the electric machine. According to the graphical interpretation of the problem - if straight lines drawn through the temperature measurement points intersect outside the permissible temperature values, then in this conductor there are at least two points with deteriorated insulation. An algorithm for determining the locations of possible insulation damage has been developed. A microprocessor implementation of the developed mathematical model has been carried out, which in combination with a temperature measurement device will allow for the practical implementation of the presented approach.*

Keywords: *electric machine, winding conductor insulation, double insulation damage, mathematical model, operation algorithm.*

Вступ. Відомо, що в процесі роботи ізоляція обмоток електричних машин великої потужності, як і іншого силового електрообладнання, під дією температури втрачає свої властивості, що може призводити до пошкодження ізоляції з подальшим погіршенням її стану аж до виникнення аварійної ситуації [1, 2].

Для контролю за технічним станом електричних машин використовуються відомі методи та засоби відслідковування зміни їх параметрів, що дозволяють спостерігати за динамікою зміни, зокрема, електричних параметрів, рівнем вібрації, довговічністю механічних деталей тощо [3, 4, 5].

Відомо також, що вимірювання температури ізоляції електричних машин відбувається безпосередньо в декількох точках з використанням сенсорів температури або опосередковано через електричні параметри режиму роботи електричної машини.

Для загального спостереження за температурним полем електричної машини можливе використання тепловізійної техніки [5, 6], однак всі зазначені вище підходи не дають однозначної інформації, коли мова йде про виявлення точки або області підвищеної температури в конкретному одному з пазів ротора або статора електричної машини.

Постановка проблеми. В роботі [7] запропоновано метод та математичну модель для виявлення точкового пошкодження ізоляції в пазу електричної

машини. Для цього здійснюються вимірювання температури з обох кінців провідника в двох точках з кожного боку на певних відомих відстанях, які обумовлені можливістю вимірювань температури на лобових частинах обмоток електричної машини.

За прийнятої умови, що температура внаслідок виділення тепла в точці нагрівання провідника довжиною l розповсюджується в обидва боки по експоненційному закону [8, 9], процес розподілу температури ілюструється на рис. 1, де введено такі позначення: t_1 – значення температури, виміряне на умовному початку провідника ($x = 0$); значення температури t_2 , виміряне на кінці провідника ($x = l$); значення температури t_3 , виміряне на відстані δ від початку провідника ($x = \delta$), та значення температури t_4 , виміряне на відстані δ від кінця провідника ($x = l - \delta$).

Зазначимо, що поняття початок та кінець провідника обмотки прийнято умовно.

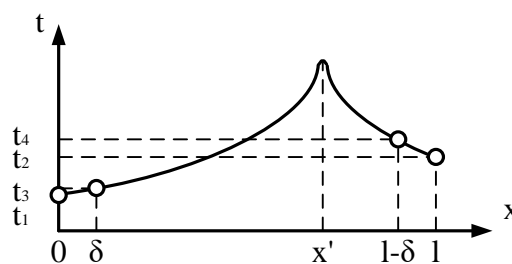


Рисунок – 1 Графічне зображення вимірюваних значень температури на кінцях провідника

За викладених вище умов точка з підвищеною температурою потенційного місця пошкодження ізоляції x' визначається відповідно до математичного виразу [7]

$$x' = \frac{\ln\left(\frac{t_4}{t_2}\right) \cdot l - \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot \delta}{\ln\left(\frac{t_4 \cdot t_3}{t_2 \cdot t_1}\right)}. \quad (1)$$

Підкреслимо, що запропонований метод дозволяє отримати лише оцінку розподілу температури і направлений на виявлення місця можливого пошкодження ізоляції.

Не менш цікавою є задача, коли в провіднику обмотки електричної машини виникає пошкодження ізоляції в двох і більше місцях, тобто в провіднику є два або більше джерела нагрівання провідника.

Очевидно, що викладений підхід не дозволяє розв'язати таку задачу.

У зв'язку з наведеним знаходження двох і більше потенційних місць пошкодження ізоляції провідника, розташованого в пазу електричної машини, є актуальною задачею.

Метою роботи є розробка математичної моделі для оцінювання виду пошкодження ізоляції обмотки електричної машини для випадку, коли обмотка провідника, розташованого в пазу ротора або статора, має два або більше місць з підвищеною температурою.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі пропонується такий підхід. Нехай у провіднику, що розташований в пазу електричної машини, дійсно є два джерела виділення тепла, тобто потенційно дві точки, в яких може бути пошкоджена ізоляція.

Припустимо, що перше джерело тепла знаходиться ближче до умовного початку провідника, а друге знаходиться, наприклад, ближче до кінця провідника, що знаходиться в пазу обмотки. Нехай інтенсивність виділення тепла в другому джерелі більша, ніж в першому. Тоді, враховуючи експоненційний характер розповсюдження тепла вздовж провідника, можемо стверджувати, що залежність, яка характеризує процес розповсюдження температури від першого джерела, має більш пологий характер, ніж від другого джерела.

Зауважимо, що коли ми були б впевнені, що джерело тепла єдине, то характер розповсюдження тепла по провіднику в обидва боки був би однаковим.

Пропонується розв'язати поставлену задачу так. На першому етапі вимірюємо температуру в двох точках з кожного боку провідника. Температури t_1° та t_2° вимірюємо на початку та в кінці провідника, а t_3° та t_4° відповідно на певній

відстані δ від обох кінців провідника наскільки такі заміри можливо виконати, враховуючи конструкцію електричної машини. Очевидно, що зазначена в кожній точці температура характеризує вплив обох джерел випромінювання тепла.

Проведемо умовно через пару точок з кожної сторони провідника прямі лінії до їх перетину. Зрозуміло, що кут нахилу цих прямих залежить від інтенсивності розповсюдження тепла в обидва боки провідника.

Проілюструємо зазначену дію у вигляді рис. 2.

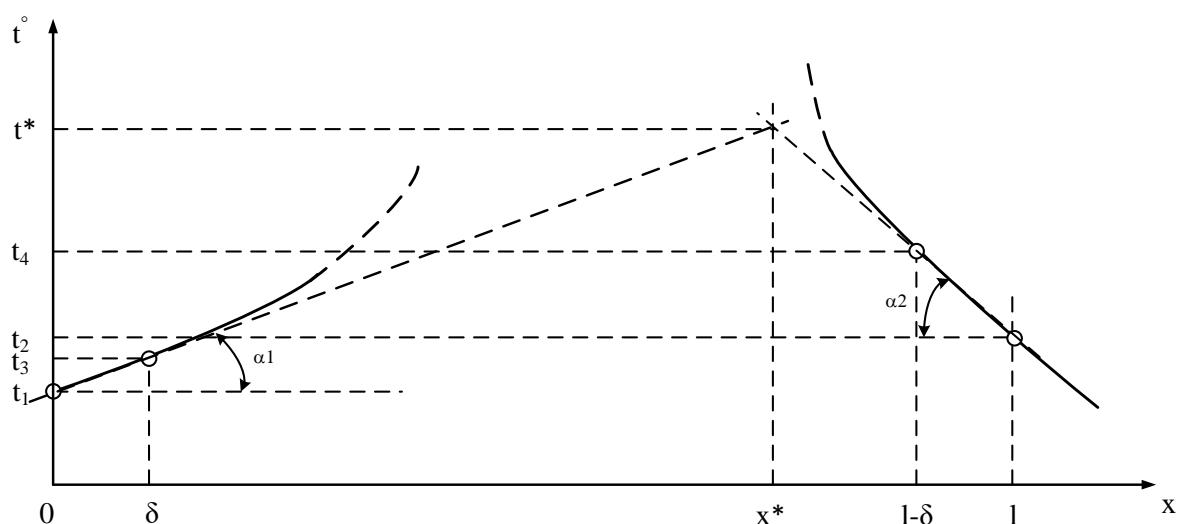


Рисунок 2 – Графічна ілюстрація процесу пошуку місць з пошкодженою ізоляцією

Представимо лінії, що проходять через точки вимірювання температури, математичними виразами виду:

- на початку провідника

$$t_{\text{п}}^{\circ} = k_1 l_1 + t_1^{\circ}; \quad (2)$$

- на кінці провідника

$$t_{\text{к}}^{\circ} = k_2 l_2 + t_2^{\circ}; \quad (3)$$

в яких коефіцієнти нахилу прямих, що проходять через характерні точки, $k_1 = \text{tg } \alpha_1$ та $k_2 = \text{tg } \alpha_2$. Очевидно, що відповідно до наших міркувань $\alpha_1 < \alpha_2$.

Знайдемо точку перетину прямих T відповідно до формул (2) та (3), яка характеризується координатами $T(x^*, t^*)$. У разі, коли в провіднику присутне більше ніж одне джерело тепла, точка T буде знаходитись в області температур,

які знаходяться поза межами допустимих робочих температур, що і є свідченням того, що в провіднику має місце більше ніж одне джерело підвищеної температури (одне пошкодження).

У разі коли $\alpha_1 = \alpha_2$ і має місце не менше двох пошкоджень ізоляції провідника спільний корінь рівнянь (2) та (3) також свідчатиме про недопустиме значення температури. Якщо ж в провіднику є пошкодження ізоляції в одній точці, то при застосуванні формули (1) можливо оцінити місце розташування потенційного пошкодження ізоляції.

Слід зазначити, що на точність вимірювання температури впливає багато факторів, зокрема циркуляція повітря, нерівномірність розподілу температури в конструкційних елементах тощо. Це підкреслює те, що запропонований підхід дає лише оцінку визначення місць можливого пошкодження ізоляції.

Нижче приведено алгоритм пошуку можливих одиночних або кратних пошкоджень ізоляції обмоток.

Такий алгоритм доцільно реалізувати з використанням, наприклад, мікроконтролера, який в поєднанні з пристроєм вимірювання температури дозволить реалізувати задачу моніторингу стану ізоляції обмоток електричної машини на предмет пошуку місць пошкодження їх ізоляції.

Відповідно до розробленого алгоритму процес виявлення пошкодженої чи ослабленої ізоляції в обмотках електричних машин здійснюється таким чином:

- в блоках 1, 2 відбувається ініціалізація та налаштування пристрою;
- в блоках 3, 4, 5 відбувається пошук та запис найвищої температури ізоляції провідників обмотки;
- в блоках 6, 7, 8 визначається залежність, що характеризує розподіл температури вздовж провідника;
- в блоках 9, 13, 17 відбувається обчислення координат точок перетину прямих, за якими визначається вид пошкодження ізоляції;
- в блоках 10, 14, 18 відбувається порівняння обчисленого значення температури з допустимим;

- в блоках 11, 12, 15, 16, 19, 20 виводиться інформації щодо виду можливого пошкодження ізоляції обмоток.
- блоки 21, 22 описують завершення роботи.

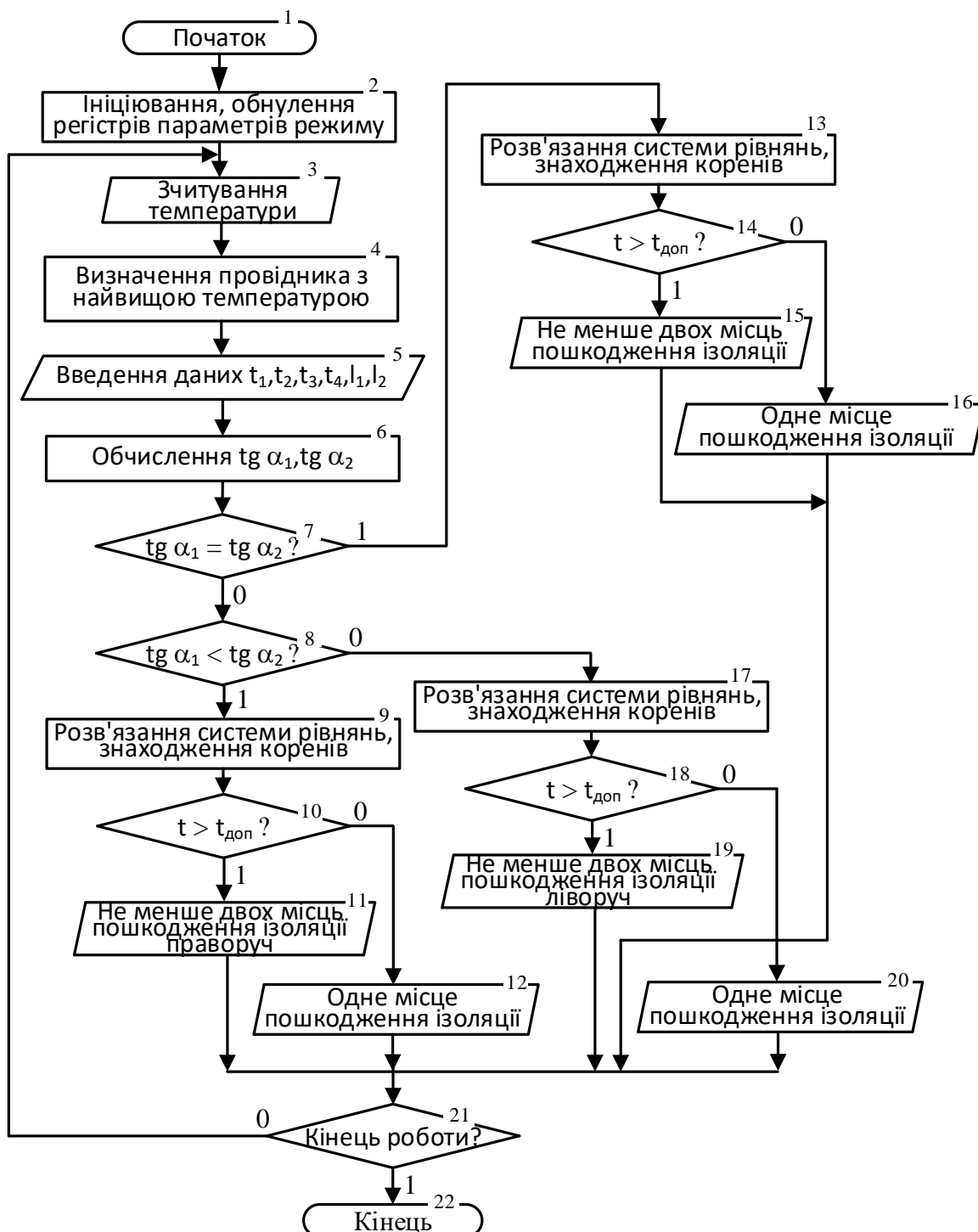


Рисунок 3 – Алгоритм визначення місця пошкодження ізоляції провідника в пазу електричної машини

Для вимірювання температури в лобових частинах обмоток статора чи ротора необхідно використовувати спеціальні пристрої, наприклад [10], а тому запропонований підхід доцільно застосовувати для моніторингу електричних машин великої потужності.

Висновки. На основі проведеного аналізу сформульована задача визначення місць подвійного погіршення ізоляції провідника, розташованого в пазу електричної машини.

Розроблено підхід та математична модель визначення місць погіршення ізоляції провідника, розташованого в пазу електричної машини в двох або більше точках.

Розроблено алгоритм пошуку місць погіршення ізоляції відповідно до представленої математичної моделі.

Мікропроцесорна реалізація запропонованої математичної моделі в поєднанні з пристроєм вимірювання температури дозволяють здійснити практичне застосування розробленого підходу.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Stephen Umans, A Fitzgerald, Charles Kingsley (2013) *Electric Machinery* McGraw-Hill, 721p.
2. Ion Boldea (2016) *Synchronous generators* Taylor & Francis Group, LLC, 472 p.
3. Greg C. Stone, Ian Culbert, Edward A. Boulter, Hussein Dhirani (2014) *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair* The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 646 p.
4. P.J. Tavner Review of condition monitoring of rotating electrical machines *IET Electr. Power Appl.*, 2008, Vol. 2, No. 4, pp. 215–247.
5. Peter Tavner, Li Ran, Christopher Crabtree (2020) *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines* The Institution of Engineering and Technology, 407 p.
6. Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing [1st ed.] *Report DMCA 2020* Springer Nature Switzerland AG 2020, 610 p.
7. Грабко В. В., Грабко В. В. (2008) *Методи і засоби для дослідження об'єктів, що обертаються, за тепловими полями*. Монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 166 с.
8. В. Малишев, В. Кретов, Т. Гладка (2015) *Технічна термодинаміка та теплопередача* Університет «Україна», 258 с.
9. Беляєв Н. М. (2014) *Основи теплопередачі* К.: Вища шк., 344 с.
10. Пат. 116408 UA, МПК G01K 13/08. Пристрій для безконтактного вимірювання температури ротора гідрогенератора [Текст] / В. В. Грабко, А. Л. Поліщук, В. В. Грабко (Україна). № а201606738; заявл. 21.06.2016; опубл. 12.03.2018, Бюл. № 5/2018.

REFERENCES:

1. Stephen Umans, A Fitzgerald, Charles Kingsley (2013) *Electric Machinery* McGraw-Hill, 721p.
2. Ion Boldea (2016) *Synchronous generators* Taylor & Francis Group, LLC, 472 p.
3. Greg C. Stone, Ian Culbert, Edward A. Boulter, Hussein Dhirani (2014) *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair* The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 646 p.
4. P.J. Tavner Review of condition monitoring of rotating electrical machines *IET Electr. Power Appl.*, 2008, Vol. 2, No. 4, pp. 215–247.
5. Peter Tavner, Li Ran, Christopher Crabtree (2020) *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines* The Institution of Engineering and Technology, 407 p.
6. Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing [1st ed.] *Report DMCA 2020* Springer Nature Switzerland AG 2020, 610 p.
7. Grabko V. V., Grabko V. V. (2008) *Methods and means for the study of rotating objects by thermal fields*. Monograph. Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 166 p.
8. V. Malyshev, V. Kretov, T. Gladka (2015) *Technical Thermodynamics and Heat Transfer* University «Ukraine», 258 p.
9. Belyaev N.M. (2014) *Fundamentals of Heat Transfer* K.: Higher School, 344 p.
10. Pat. 116408 UA, MPK G01K 13/08. Device for non-contact measurement of the temperature of the hydrogenerator rotor [Text] / V. V. Grabko, A. L. Polishchuk, V. V. Grabko (Ukraine). No. a201606738; appl. 21.06.2016; publ. 12.03.2018, Bull. No. 5/2018.

Стаття надійшла до редакції: 08.04.2026; рецензування: 15.04.2026;

прийнята до публікації 21.04.2026. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 08.04.2026; revised on 15.04.2026; and accepted for publication on 21.04.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.