

УДК 629.4.01:[621.33:629.423.31]

О. С. ШАПОВАЛОВ^{1*}, А. А. АФАНАСОВА^{2*}, І. Ю. ПОТАПЧУК^{3*}

^{1*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта o.s.shapovalov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-3151-6574

^{2*}Каф. «Автоматизації електромеханічних та мехатронних комплексів», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», вул. Борщагівська, 115, 03056, Київ, Україна, тел. +38 (044) 204 82 25, ел. пошта nastaaфанасовav@gmail.com, ORCID 0009-0009-3627-1551

^{3*}Каф. «Інтелектуальні системи енергопостачання», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, г. Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 25, ел. пошта i.y.potapchuk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5985-1040

АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ПРОТІКАЮТЬ В ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОМАШИНАХ ПРИ ВИПРОБУВАННІ НА НАГРІВАННЯ

Мета. Відомо, що під час прийнятно-здавальних випробувань, які проводяться відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 2582:2017, теплове навантаження обмоток двигунів і генераторів може суттєво відрізнятися, що впливає на точність отриманих результатів. Сам характер теплового навантаження значною мірою залежить від схеми випробувань та способу покриття втрат потужності в електромашині. Дослідження теплових процесів, що відбуваються в обмотках тягових електромашин під час їх випробувань на нагрівання є своєчасними та актуальними. Метою наукового дослідження є розробка та наукове обґрунтування методу оцінки ступеня розходження теплових навантажень обмоток якорів та обмоток збудження пари взаємно навантажених випробуваних тягових електромашин, **Методи.** Аналіз теплових процесів в активних частинах тягових електромашин під час їх випробування на нагрів виконано з використанням теорії нагрівання однорідного твердого тіла та відомих методів розрахунку теплових схем. **Результати.** Встановлено, що тепловий потенціал обмоток електромашин визначаються як електричними втратами потужності в обмотках, так і магнітними втратами потужності в магнітопроводі. Було розглянуто вплив кожного виду втрат на перегрів обмоток, а також запропоновано спрощену теплову схему заміщення для якісного аналізу цих процесів. Дослідження показали, що електричні втрати мають домінуючий вплив на формування теплового потенціалу обмоток, тоді як вплив магнітних втрат є значно меншим – відношення відносного коефіцієнта впливу електричних втрат до коефіцієнта впливу магнітних втрат дорівнює трьом. Запропоновано методику визначення ступеня впливу перевантаження або недовантаження за струмом і магнітним потоком на температуру обмоток якоря. Методика враховує параметри втрат у годинному та тривалому режимах роботи тягових електромашин. Особливу увагу приділено складнощам розрахунку нестационарних теплових процесів та можливості їх якісного аналізу за допомогою спрощених моделей. **Наукова новизна.** Запропоновано науково обґрунтований метод оцінки ступеня розходження теплових навантажень обмоток якорів та обмоток збудження пари взаємно навантажених випробуваних тягових електромашин, яке визначає якість випробування. Отримано графічні залежності питомого перевищення температури якоря випробуваного двигуна від питомих втрат у міді та сталі, зокрема для тягового двигуна НБ-406. Отримані результати свідчать про адекватність запропонованої методики та її відповідність реальним умовам випробувань. **Практична значимість.** Отримані в роботі наукові результати можуть бути використані при вдосконаленні методів теплових випробувань тягових електромашин. Їх використання дозволяє підвищити точність оцінки теплових процесів в електромашині та забезпечити їх відповідність експлуатаційним умовам та підвищити якість випробувань. Запропоновану методику може бути використано як один із критеріїв вибору раціонального варіанту схеми взаємного навантаження.

Ключові слова: тягові електромашини, випробування на нагрівання, обмотки, електричні втрати, магнітні втрати, схема заміщення, тепловий опір.

Вступ

Ступінь відповідності характеристик теплових процесів, що протікають в обмотках тягових електромашин при їх випробуванні, і в умовах експлуатації багато в чому визначається прийнятою схемою випробувань. Відповідно до ДСТУ ГОСТ 2582:2017 [1, с. 19] при прийнятно-здавальних випробуваннях методом взаємного навантаження режими роботи обох випробуваних

електромашин вважають дійсними незважаючи на те, що теплове навантаження їх обмоток може відрізнятися [2, с. 258-262]. Ступінь відмінності теплового навантаження обмоток випробуваних електромашин буде визначатися прийнятим способом покриття втрат у схемі взаємного навантаження та ступенем залежності теплових потенціалів обмоток від втрат потужності в різних активних частинах електромашин [3, с. 183-

189]. Таке розходження впливає на якість випробувань.

Постановка завдання дослідження

Однією з важливих умов забезпечення високої інформативності результатів та якості теплових випробувань є однакове теплове навантаження лімітуючих обмоток випробуваного двигуна та генератора [4, с. 37-39]. Теплове перевантаження або недовантаження лімітуючої обмотки однієї з випробуваних електромашин не дає можливості адекватної оцінки результатів випробувань на нагрівання у разі перегріву перевантаженої обмотки або недогрівання недовантаженої.

Вимоги [1, с. 12-14] в частині струмового навантаження випробуваних двигунів і генераторів є формальним, так як не враховує ні схеми випробування, ні те, яка з обмоток електромашини є лімітуючою. Така формалізація виправдана самим декларативним принципом обмеження температури перегріву обмоток за класом їх ізоляції.

Матеріал і результати досліджень

Розглянемо вплив кожного виду втрат у якорі на перегрів його обмотки. Для спрощення аналізу будемо враховувати тільки електричні та магнітні втрати в активних частинах якоря електромашини [5, с. 276-289]. Загальні додаткові втрати при цьому можуть бути розділені на втрати в міді і сталі, а отже віднесені до втрат, що гріють мідь і сталь відповідно [6, с. 150-157]. Для вирішення поставленої задачі будемо використовувати спрощену теплову схему заміщення якоря [5, с. 284], наведену на рис.1.

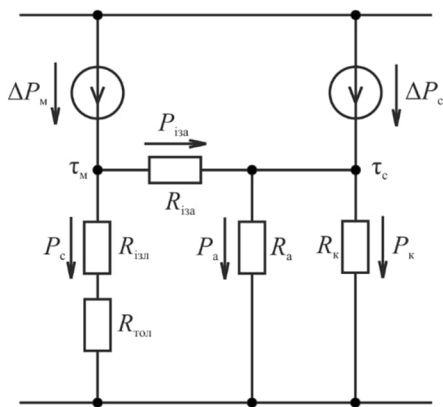


Рис. 1. Спрощена теплова схема заміщення якоря

У схемі прийнято такі позначення:

τ_m – перевищення температури міді обмотки якоря;

τ_c – перевищення температури сталі якоря;

ΔP_m – сумарні втрати потужності в міді обмотки якоря;

ΔP_c – сумарні втрати потужності в сталі якоря;

$R_{изл}$ – тепловий опір потоку $R_{изл}$ крізь ізоляцію активної частини провідників якоря;

$R_{изл}$ – тепловий опір потоку $R_{изл}$ крізь ізоляцію лобових частин провідників якоря;

$R_{тол}$ – тепловий опір потоку P_l конвективного розсіювання з поверхні лобових частин обмотки якоря;

R_a – тепловий опір потоку P_a конвективного розсіювання з поверхні сердечника якоря;

R_k – тепловий опір потоку P_k конвективного розсіювання з поверхні внутрішніх вентиляційних каналів сердечника якоря.

За допомогою теплового потоку $R_{изл}$ відбувається кондуктивний теплообмін між міддю та сталлю якоря:

$$P_{изл} = Y_{изл} (\tau_m - \tau_c), \quad (1)$$

де $Y_{изл}$ – теплова провідність шару ізоляції обмотки якоря.

$$Y_{изл} = \frac{1}{R_{изл}}. \quad (2)$$

Передача тепла в навколишнє середовище від лобових частин обмотки якоря носить кондуктивно-конвективний характер і може бути описана виразом:

$$P_l = Y_l \tau_m, \quad (3)$$

де Y_l – еквівалентна теплова провідність лобових частин, обумовлена теплопровідністю та тепловіддачею, визначається за формулою:

$$Y_l = \frac{1}{R_{изл} + R_{тол}}.$$

Конвективний теплообмін сталі якоря з навколишнім середовищем може бути описаний рівняннями:

$$P_a = Y_a \tau_c, \quad (4)$$

$$P_k = Y_k \tau_c, \quad (5)$$

де Y_a – теплова провідність, обумовлена конвективною тепловіддачею з поверхні сталевих пакетів якоря;

Y_k – теплова провідність, обумовлена конвективною тепловіддачею з поверхні вентиляційних каналів сердечника якоря.

Теплові провідності конвективної тепловіддачі з поверхні пакета якоря та вентиляційних каналів у ньому визначаються за формулами:

$$Y_a = \frac{1}{R_a}; \quad Y_k = \frac{1}{R_k} \quad (6)$$

Для теплової схеми заміщення (рис. 1) будуть справедливі вирази:

$$\Delta P_M - P_l - P_{13a} = 0, \quad (7)$$

$$\Delta P_{13a} + \Delta P_c - P_a - P_k = 0. \quad (8)$$

В результаті спільного вирішення рівнянь (1)–(8) після ряду перетворень отримаємо вираз для визначення усталеної температури міді обмотки якоря:

$$\tau_M = \frac{\Delta P_M (Y_{13a} + Y_a + Y_k) + \Delta P_c Y_{13a}}{Y_l Y_{13a} + (Y_a + Y_k) Y_{13a} + (Y_a + Y_k) Y_l}. \quad (9)$$

Вираз (9) може бути представлено у вигляді [9, с. 153-158]:

$$\tau_M = K_M \Delta P_M + K_C \Delta P_c, \quad (10)$$

де K_M і K_C – вагові коефіцієнти, що визначають ступінь впливу кожного з видів втрат в якорі на температуру його обмотки.

$$K_M = \frac{Y_{13a} + Y_a + Y_k}{Y_l Y_{13a} + (Y_a + Y_k) Y_{13a} + (Y_a + Y_k) Y_l}. \quad (11)$$

$$K_C = \frac{Y_{13a}}{Y_l Y_{13a} + (Y_a + Y_k) Y_{13a} + (Y_a + Y_k) Y_l}. \quad (12)$$

У відносних параметрах вираз (10) можна представити у вигляді:

$$\tau_{\text{мотн}} = k_M \cdot p_M + k_C \cdot p_C, \quad (13)$$

де $\tau_{\text{мотн}}$ – встановлена температура міді обмотки якоря, віднесена до її встановленого значення $\tau_{\text{МН}}$ при номінальному режимі;

$p_M p_C$ – питомі значення втрат у міді та сталі, віднесені до відповідних втрат $\Delta p_{\text{МН}}$, $\Delta p_{\text{СН}}$ в номінальному режимі; напруга джерела живлення;

k_M, k_C – питомі безрозмірні вагові коефіцієнти впливу втрат у міді та сталі відповідно.

$$\tau_{\text{мотн}} = \frac{\tau_M}{\tau_{\text{МН}}}. \quad (14)$$

$$p_M = \frac{\Delta P_M}{\Delta P_{\text{МН}}}. \quad (15)$$

$$p_C = \frac{\Delta P_C}{\Delta P_{\text{СН}}}. \quad (16)$$

$$k_M = K_M \frac{\Delta P_{\text{МН}}}{\tau_{\text{МН}}}. \quad (17)$$

$$k_C = K_C \frac{\Delta P_{\text{СН}}}{\tau_{\text{МН}}}.$$

Неважно переконатися у справедливості виразу:

$$k_M + k_C = 1. \quad (18)$$

Слід зазначити, що коефіцієнт k_M і k_C визначаються самим виконанням електромашини і по суті є конструкційними [9, с. 188-196]. Вони можуть бути розраховані для кожного типу тягового електродвигуна за креслярськими розмірами і даними кваліфікаційних випробувань.

Для практичних розрахунків ступеня впливу перевантаження або недовантаження за струмом і магнітному потоку на температуру обмотки якоря випробуваної електромашини можуть бути використані відомі формули [7, с. 183-186; 10, с. 105-126] для визначення теплових опорів схеми заміщення, наведеної на рис. 1:

$$k_{\text{ізіл}} = \frac{b_{\text{ізіл}}}{\lambda S_l},$$

де $b_{\text{ізіл}}$ – еквівалентна товщина ізоляції лобових частин;

λ – питома теплопровідність ізоляції;

S_l – площа поверхні лобових частин.

$$S_l = \pi D_a l_l, \quad (19)$$

де D_a – діаметр якоря;

l_l – сумарна довжина вильотів передньої та задньої частини обмотки.

$$R_{\text{тол}} = \frac{1}{\alpha S_l}, \quad (20)$$

де α – коефіцієнт конвективної тепловіддачі.

$$\alpha = \alpha_o (1 + \sqrt{v_b^2 + v_a^2}), \quad (21)$$

де α_o – коефіцієнт тепловіддачі у спокійній атмосфері;

v_b – швидкість охолоджуючого повітря в осьовому напрямку;

v_a – лінійна швидкість якоря.

$$R_{\text{іза}} = \frac{b_{\text{іза}}}{\lambda z l_a p_{\text{п}}}, \quad (22)$$

де $b_{\text{іза}}$ – еквівалентна товщина ізоляції активних частин провідників обмотки якоря;

z – число пазів якоря;

l_a – довжина активної частини якоря;

$p_{\text{п}}$ – розрахунковий периметр пазу.

$$p_{\text{п}} = 1,33b_{\text{п}} + 2h_z, \quad (23)$$

де b_n і h_z – ширина та глибина пазу відповідно.

$$R_a = \frac{1}{\alpha \pi D_a l_a}. \quad (24)$$

$$R_k = \frac{2}{\alpha m_k \pi d_k l_a}, \quad (25)$$

де m_k – число вентиляційних каналів;

d_k – діаметр вентиляційного каналу.

Необхідно відзначити, що вираз (9), отриманий в результаті проведеного аналізу, є вірним для режиму, що встановився, і не підходить для визначення температури перегріву обмотки якоря в годинному режимі, який є нестационарним. Відповідно до ДСТУ 2582:2017 прийнятно-здавальні випробування тягових електродвигунів електрорухомого складу проводять саме у годинному режимі. Враховуючи монотонно зростаючий характер функції $\tau_m = f(t)$ [5, с. 279], можна зробити висновок про те, що вираз (13), записаний у відносних одиницях, буде справедливим і для нестационарного годинного режиму. При цьому всі параметри, що входять у вираз (13), повинні бути приведені до годинних значень втрат потужності. При правильно визначених годинному та тривалому режимах тягового електродвигуна реальне перевищення температури τ_m буде однаковим для обох режимів і дорівнює допустимому значенню перегріву.

Визначення перевищення температури τ_m не є метою даного аналізу, проте необхідно зазначити, що вирішення цієї задачі можливе тільки з урахуванням зміни опору обмотки якоря протягом часу випробування. Втрати ΔP_M самі є величинами, залежними від температури, а отже, і часу випробування [5, с. 278-279].

$$\Delta P_M = [1 + 0,004(\tau_m + 5^\circ)] \times [I_a^2 r_a + \Delta P_{MK}] + \Delta P_{МП}, \quad (26)$$

де I_a – струм якоря;

r_a – опір обмотки якоря при температурі 20°C ;

ΔP_{MK} – комутаційні втрати;

$\Delta P_{МП}$ – втрати в міді якоря від головного пазового поля.

Строго кажучи, коефіцієнти k_M і k_C для годинного та тривалого режимів відрізнятимуться. Проте, враховуючи суттєву складність розрахунку нестационарних теплових процесів, якісний аналіз впливу різних видів втрат на значення перевищення температури обмотки якоря у годинному режимі випробування може бути проведений з використанням коефіцієнтів k_M і k_C ,

отриманих для стаціонарного тривалого режиму навантаження.

Розроблений метод оцінки ступеня розходження теплових навантажень обмоток якорів та обмоток збудження у взаємно навантажених тягових електромашин дозволяє оцінити якість випробування.

Графічно залежність питомого перевищення температури якоря випробуваного електродвигуна від питомих втрат у міді та сталі для тягового двигуна НБ-406 [8, с. 185], отримана за цією методикою, наведена на рис. 2. Значення коефіцієнтів, отримані в результаті розрахунку: $k_M=0,76$; $k_C=0,24$.

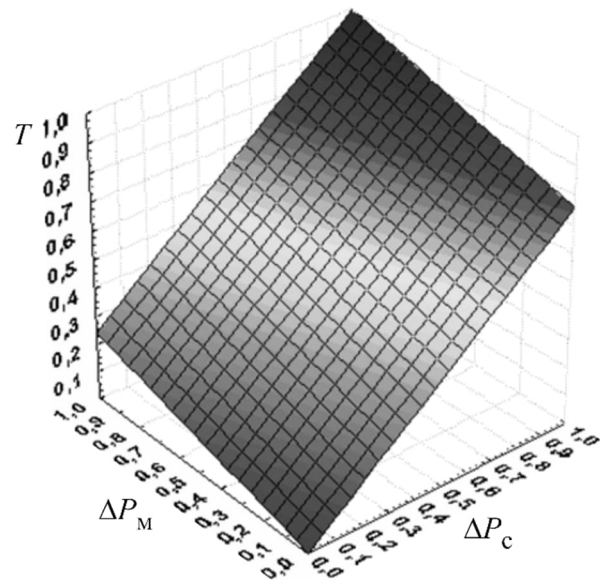


Рис. 2. Залежність $\tau_{\text{мотн}} = f(p_M; p_C)$ для тягового двигуна НБ-406

Висновки

1. Ступінь відмінності теплового потенціалу обмоток випробуваних електромашин при їх випробуванні визначатися способом покриття втрат у схемі навантаження та ступенем залежності теплового навантаження обмоток від втрат потужності в різних частинах електромашин

2. Формування теплового потенціалу обмоток випробуваних електромашин за принципом суперпозиції може бути представлено як результат впливу двох окремих факторів: електричних втрат потужності в обмотках електромашин та магнітних втрат потужності в магнітопроводі.

3. Більшою мірою тепловий потенціал обмотки якоря формується електричними втратами в ній і меншою мірою магнітними втратами. Відношення відносного коефіцієнту впливу електричних втрат до коефіцієнту впливу магнітних втрат дорівнює трьом.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ДСТУ ГОСТ 2582:2017 Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия (ГОСТ 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ). Київ : «УкрНДНЦ», 2017. 50 с
2. Афанасов А. М. Теоретический анализ энергетических процессов при взаимной нагрузке тяговых электрических машин постоянного тока. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2008. № 25. С. 258–262.
3. Афанасов А. М. Принципы синтеза схем взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного тока. *Гірнична електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб.* 2010. № 85. С. 183–189.
4. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Москва : Трансп., 1985. 287 с.
5. Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А. Тяговые электрические машины : навч. посіб. Москва : Трансп., 1991. 343 с.

6. Данилевич Я. Б., Кашарский Э. Г. Добавочные потери в электрических машинах. Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. 214 с.

7. Находкин М. Д. Проектирование тяговых электрических машин. Москва : Трансп., 1976. 624 с.

8. Режимы работы магистральных электровозов / О. А. Некрасов та ін. ; ред. О. А. Некрасов. Москва : Трансп., 1983. 231 с.

9. Афанасов А. М. Системы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока. Дніпро : Маковец., 2012. 248 с.

10. Курбасов А., Седов В., Сорин Л. Проектирование тяговых электродвигателей / ред. А. Курбасов. Москва : Трансп., 1987. 536 с.

Надійшла до редколегії 12.11.2024.

Прийнята до друку 25.02.2025.

O. SHAPOVALOV, A. AFANASOVA, I. POTARCHUK

ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES OCCURRING IN TRACTION ELECTRIC MACHINES DURING HEATING TESTS

Purpose. It is known that during acceptance tests, which are carried out in accordance with the requirements of DSTU GOST 2582:2017, the thermal load of the windings of engines and generators can differ significantly, which affects the accuracy of the results obtained. The nature of the thermal load itself largely depends on the test scheme and the method of covering power losses in electric machines. Studies of thermal processes occurring in the windings of traction electric machines during their heating tests are timely and relevant. The purpose of the scientific research is to develop and scientifically substantiate a method for assessing the degree of difference in thermal loads of the armature windings and excitation windings of a pair of mutually loaded tested traction electric machines, **Methodology.** The analysis of thermal processes in the active parts of traction electric machines during their heating tests was performed using the theory of heating of a homogeneous solid and known methods for calculating thermal schemes. **Findings.** It was established that the thermal potential of electric machine windings is determined by both electrical power losses in the windings and magnetic power losses in the magnetic core. The influence of each type of loss on the overheating of the windings was considered, and a simplified thermal equivalent scheme was proposed for the qualitative analysis of these processes. Studies have shown that electrical losses have a dominant influence on the formation of the thermal potential of the windings, while the influence of magnetic losses is much smaller - the ratio of the relative coefficient of influence of electrical losses to the coefficient of influence of magnetic losses is equal to three. A method for determining the degree of influence of overload or underload by current and magnetic flux on the temperature of the armature windings is proposed. The method takes into account the parameters of losses in hourly and long-term operating modes of traction electric machines. Special attention is paid to the difficulties of calculating non-stationary thermal processes and the possibility of their qualitative analysis using simplified models. **Originality.** A scientifically substantiated method for assessing the degree of difference in thermal loads of the armature windings and excitation windings of a pair of mutually loaded tested traction electric machines is proposed, which determines the quality of the test. Graphical dependences of the specific temperature rise of the armature of the tested motor on the specific losses in copper and steel, in particular for the NB-406 traction motor, are obtained. The results obtained indicate the adequacy of the proposed methodology and its compliance with real test conditions. **Practical value.** The scientific results obtained in the work can be used in improving the methods of thermal testing of traction electric machines. Their use allows to increase the accuracy of the assessment of thermal processes in electric machines and ensure their compliance with operating conditions and improve the quality of tests. The proposed methodology can be used as one of the criteria for choosing a rational variant of the mutual loading scheme.

Keywords: traction electric machines, heating tests, windings, electrical losses, magnetic losses, equivalent circuit, thermal resistance.