

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕГРІВУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА (ДК-409) КОМПРЕСОРА (ЭК-7Б) ЕЛЕКТРОПОЇЗДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (ЭР-1, ЭР-2) ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕПЛОВОЇ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ

В статті показано методику дослідження теплових процесів, що протікають у електродвигуні компресора електропоїзда з метою визначення величин перегріву, які в подальшому будуть використані для оцінки ступеню їх впливу на стан ізоляції.

В статье показано методику исследования тепловых процессов, протекающих в электродвигателе компрессора электропоезда с целью определения значений перегрева, которые в дальнейшем будут использованы для оценки степени их воздействия на состояние изоляции.

The article shows the method of investigation of thermal processes occurring in the electric compressor motor of rolling stock to determine the values of overheating, which will later be used to assess their impact on the state of isolation.

Статистика виходу з ладу в депо Дніпропетровськ двигунів ДК 409 (електропоїздів ЭР1, ЭР2) показує [1], що кількість виходу з ладу вказаних типів двигунів по роках складає: 2000 р – 56; 2001 р. – 34; 2002 р. – 42; 2003 р. – 56; 2004 р. – 31; 2005 р. – 32; 2006 р. – 25; 2008 р. – 26; 2009 р. – 15; 2010 р. – 12. Причому «електричні» пошкодження (прогар обмотки якоря та обмотки головного полюса) складають основну масу пошкоджень. Згідно [5] гранично – допустимий перегрів ізоляції класу В електродвигуна компресора для якоря складає 120°C, а для полюсів – 130°C. Тому теплову схему заміщення розглянемо відносно якоря двигуна [2,6].

При створенні теплової схеми прийняті наступні допущення:

- температура усього об'єму міді якоря однакова;

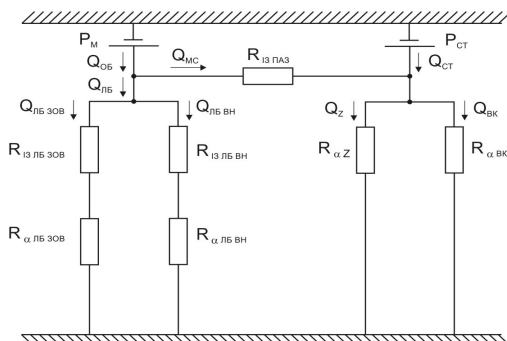


Рис. 1. Еквівалентна теплова схема якоря електродвигуна ДК-409

- температура осердя якоря, включаючи й зубці, також однакова у всьому об'ємі;

- відводом тепла через клини, які призначені для закріплення обмотки в пазах, через їх малу теплопровідність, нехтуємо;

- теплопровідність сталевих обмоткотримачів приймаємо рівною безкінечності, що означає – відвід тепла від лобових з'єднань обмотки через обмоткотримачі відбувається без перепаду тепла в них;

- температура повітря, яке охолоджує як зовнішні, так і внутрішні поверхні якоря однакова.

Загальна схема протікання теплових потоків показана на рис.1.

У колі є два джерела теплових потоків: обмотка якоря з втратами в ній P_m та сталеве осердя якоря із втратами $P_{ст}$. Як правило, мідь обмотки нагрівається до більш високої температури, ніж сталь осердя.

Тепловий потік $Q_{об} = P_m$ ділиться на два:

$$Q_{об} = Q_{лб} + Q_{мс} \quad (1)$$

Перший з них $Q_{лб}$ передається повітрю, яке охолоджує, через тепловіддаючі поверхні лобових з'єднань обмотки; другий $Q_{мс}$ переходить із міді обмотки через пазову ізоляцію з опором $R_{изпаз}$ у сталь осердя якоря.

Потік від лобових з'єднань $Q_{лб}$ у свою чергу ділиться на два:

$$Q_{\text{лб}} = Q_{\text{лбзов}} + Q_{\text{лбвн}}, \quad (2)$$

де $Q_{\text{лбзов}}$ – потік, який проходить скрізь ізоляційне покриття зовнішньої поверхні лобових з'єднань (тепловий опір $R_{\text{ізлбзов}}$) і який передається з цієї поверхні охолоджуючому повітрю – тепловий опір цієї охолоджуючої поверхні $R_{\alpha\text{лбзов}}$; $Q_{\text{лбвн}}$ – потік, який проходить скрізь ізоляційний шар із внутрішнього боку лобових з'єднань (тепловий опір його $R_{\text{ізлбвн}}$) і передається з нього повітрю, яке охолоджує – тепловий опір цієї охолоджуючої поверхні $R_{\alpha\text{лбвн}}$.

Тепловий потік $Q_{\text{мс}}$, який проходить від міді обмотки в сталеве осердя, складається з власним тепловим потоком якоря $Q_{\text{ст}} = P_{\text{ст}}$. Сумарний тепловий потік $Q_{\text{ст}} + Q_{\text{мс}}$ віддається охолоджуючому повітрю двома шляхами: з поверхні зубців якоря, які мають тепловий опір $R_{\alpha z}$ у розмірі Q_z та з поверхні внутрішніх вентиляційних каналів, які мають тепловий опір $R_{\alpha\text{вк}}$ у розмірі $Q_{\text{вк}}$. Таким чином,

$$Q_{\text{ст}} + Q_{\text{мс}} = Q_z + Q_{\text{вк}}. \quad (3)$$

Перший з них $Q_{\text{лб}}$ передається повітрю, яке охолоджує, через тепловіддаючі поверхні лобових з'єднань обмотки; другий $Q_{\text{мс}}$ переходить із міді обмотки через пазову ізоляцію з опором $R_{\text{ізпаз}}$ у сталь осердя якоря.

Тепловий опір R_{α} охолоджуючої поверхні дорівнює [2]:

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha_v \cdot S}, \quad (4)$$

де α_v – коефіцієнт теплорозсіювання у повітрі, яке рухається, $\text{Вт}/^{\circ}\text{С}\cdot\text{см}^2$; S – поверхня нагрітого тіла, з якої відводиться тепло шляхом конвекції, см^2 .

Коефіцієнт α_v можна визначити по емпіричній залежності [2]:

$$\alpha_v = \alpha(1+0,1v), \quad (5)$$

де α – коефіцієнт теплорозсіювання у повітрі, яке не рухається, $\text{Вт}/^{\circ}\text{С}\cdot\text{см}^2$; v – швидкість охолоджуючого повітря в м/с.

Коефіцієнт α_v , який визначає значення сталого перевищення температури:

$$\tau = Q/(\alpha_v \cdot S), \quad (6)$$

що являє собою не фізичний коефіцієнт теплорозсіювання поверхні, а розрахункову величину, значення якої залежить від вибору значення S при заданих втратах Q , тобто при розрахунках α_v потрібно вказувати, як повинна бути розрахована поверхня охолодження.

По аналогії з формулою закону Ома для електричних кіл вираз (6) запишеться наступним чином:

$$\tau = Q \cdot R_{\alpha}, \quad (7)$$

де R_{α} – тепловий опір охолоджуючої поверхні.

Тепловий опір ізоляції $R_{\text{із}}$ визначається формулою [3]:

$$R_{\text{із}} = \frac{\delta_{\text{із}}}{\lambda \cdot S}, \quad (8)$$

де $\delta_{\text{із}}$ – товщина ізоляції; λ – питома теплопровідність ізоляційного матеріалу.

Питома теплопровідність теплового кола аналогічна питомій електропровідності електричного кола.

Знаючи розміри і характер тепловіддаючих поверхонь, а також матеріал і товщини ізоляційних покриттів, характер та ефективність системи вентиляції, враховуючи схему теплових потоків в якорі двигуна (рис. 2), використовуючи формули (8) та (4) визначаються значення теплових опорів як тепловіддаючих поверхонь ($R_{\alpha\text{лбзов}}$, $R_{\alpha\text{лбвн}}$, $R_{\alpha z}$, $R_{\alpha\text{вк}}$), так і теплових опорів шарів ізоляції ($R_{\text{ізпаз}}$, $R_{\text{ізлбзов}}$, $R_{\text{ізлбвн}}$).

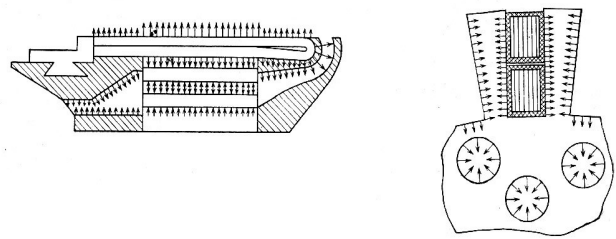


Рис. 2. Схема теплових потоків в якорі електродвигуна ДК – 409

Після цього знаходять загальні опори тепловому потоку зовнішньої ($R_{\text{лбзов}}$) та внутрішньої ($R_{\text{лбвн}}$) поверхонь лобових з'єднань:

$$\begin{cases} R_{\text{лбзов}} = R_{\text{ізлбзов}} + R_{\alpha\text{лбзов}} \\ R_{\text{лбвн}} = R_{\text{ізлбвн}} + R_{\alpha\text{лбвн}} \end{cases} \quad (9)$$

Тоді схему на рис. 1 можна представити у наступному вигляді – рис. 3.

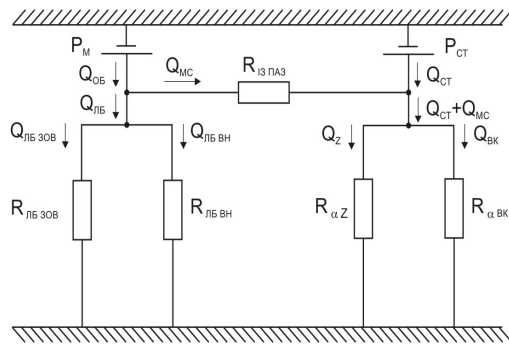


Рис. 3. Еквівалентна теплова схема якоря двигуна ДК-409 (перший етап перетворення)

Аналогічно, загальний опір тепловому потоку $Q_{CT} + Q_{MC}$, який віддається сталевому осердю якоря:

$$R_{CT} = \frac{R_{\alpha Z} R_{\alpha BK}}{R_{\alpha Z} + R_{\alpha BK}}. \quad (11)$$

Тоді теплова схема рис. 3 приймає вигляд – рис. 4.

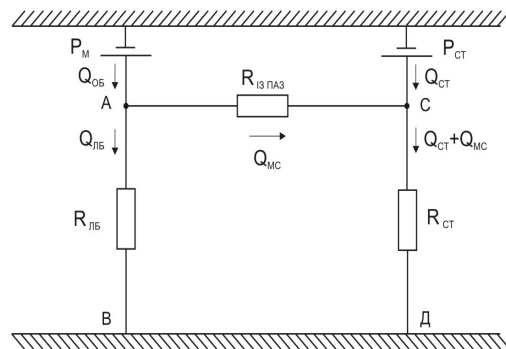


Рис. 4. Еквівалентна теплова схема якоря двигуна ДК-409 (другий етап перетворення)

Відносно схеми приведеної на рис. 4 можна написати наступне. Тепловий потік Q_{LB} , проходячи через тепловий опір R_{LB} , зумовлює перепад температури міді обмотки над температурою охолоджуючого повітря, який дорівнює:

$$\tau_{обм} = Q_{LB} \cdot R_{LB}. \quad (12)$$

Перевищення температури сталі осердя над температурою охолоджуючого повітря дорівнює:

$$\tau_{CT} = (Q_{CT} + Q_{MC}) \cdot R_{CT}. \quad (13)$$

Крім того, спад теплового потенціалу на ділянці АВ дорівнює спаду потенціалу на ділянці СД, тобто:

$$Q_{LB} \cdot R_{LB} = Q_{MC} \cdot R_{I3\text{ паз}} + (Q_{CT} + Q_{MC}) \cdot R_{CT}. \quad (14)$$

Маємо систему із чотирьох рівнянь:

$$\begin{cases} Q_{обм} = Q_{LB} + Q_{MC} \\ \tau_{обм} = Q_{LB} \cdot R_{LB} \\ \tau_{CT} = (Q_{CT} + Q_{MC}) \cdot R_{CT} \\ Q_{LB} \cdot R_{LB} = Q_{MC} \cdot R_{I3\text{ паз}} + (Q_{CT} + Q_{MC}) \cdot R_{CT} \end{cases} \quad (15)$$

У системі (15) маємо чотири невідомих: Q_{LB} , Q_{MC} , $\tau_{обм}$, τ_{CT} . Розв'язок цієї системи дозволяє знайти значення перевищення температури $\tau_{обм}$ та τ_{CT} . Обмежуючим є значення перевищення температури обмотки $\tau_{обм}$ (це значення для ізоляції класу В дорівнює 120°C).

Для розв'язку системи рівнянь (15) необхідно мати величини теплових опорів R_{LB} , R_{CT} , $R_{I3\text{ паз}}$, а також теплові потоки $Q_{обм} = Q_{LB} + Q_{MC}$ і $Q_{CT} = (Q_{CT} + Q_{MC}) \cdot R_{CT} / R_{I3\text{ паз}}$.

Знаючи розміри та характер тепловіддаючих поверхонь, матеріал і товщину ізоляційних покриттів, а також характер та ефективність системи вентиляції, використовуючи вирази (4), (8) можливо визначити величини теплових опорів R_{LB} , R_{CT} , $R_{I3\text{ паз}}$.

Втрати в міді обмотки якоря можуть бути отримані з наступної залежності [4,6]:

$$P_M = \left(\frac{I}{2 \cdot a} \right)^2 \cdot \frac{N \cdot l_{пр}}{4600 \cdot S_{пр}}, \quad (16)$$

де I – струм навантаження, А; a – число пар паралельних віток обмотки; N – число провідників обмотки якоря; $l_{пр}$ – довжина половини витка обмотки, см; $S_{пр}$ – площа поперечного перерізу провідника, мм^2 .

Сумарні втрати в сталі якоря машини при будь-якій частоті та індукції можна виразити у вигляді [4, 6]:

$$P_{CT} = P_{[1/50]} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^\beta \cdot B^2 \cdot G_{CT}, \quad (17)$$

де $P_{[1/50]}$ – питомі втрати при $B=1$ Тл і $f=50$ Гц, Вт/кг; f – частота перемагнічування сталі, Гц; β – показник степені, рівний в середньому для слабо легованих сталей $\beta=1,5$; B – розрахункова індукція в якорі машини, Тл; G_{CT} – маса якоря машини, кг.

Відомо, що методом теплових схем можна підрахувати перегрів тільки в стаціонарних режимах роботи електричної машини, тобто отриманий перегрів обмотки якоря $\tau_{обм}$ в результаті розв'язання системи рівнянь (15) є кінцевим при тривалій роботі машини із струмом навантаження I .

Найбільший інтерес представляють перехідні режими роботи двигуна і відповідно характер теплових процесів в цих режимах.

Визначаємо величину перегріву необхідної частини електричної машини за відомий проміжок часу, наприклад в режимі пуску [2, 4]:

$$\tau_{кн} = \tau \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_A}\right)} \right) + \tau \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \quad (18)$$

де $\tau_{кн}$ – кінцевий перегрів даної частини машини, °C; T_A – постійна часу нагрівання якоря двигуна, хв.; t – час перехідного процесу, хв.; τ_0 – початковий перегрів даної частини машини, °C.

Оскільки розрахунок величини перегріву якорної обмотки електричної машини досить трудомісткий процес, то доцільно його автоматизувати з допомогою спеціальних математичних програм на ЕОМ.

Вихідними даними для розрахунку величин перегріву є значення еквівалентних струмів, що отримані за допомогою раніше створеної математичної моделі [7] і приведені на рис.5.

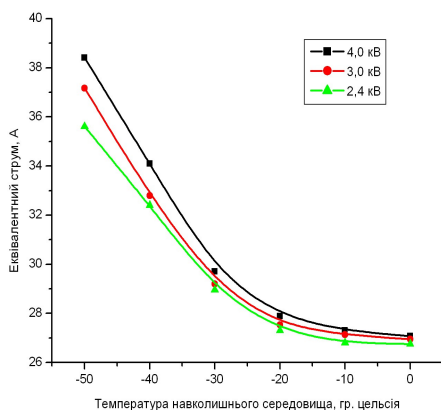


Рис. 5. Залежність величини еквівалентного струму від температури навколишнього середовища при різних значеннях напруги в контактній мережі

Таким чином кінцевим результатом даного дослідження є отримання значень перегріву ізоляції якоря класу В електродвигуна компресора при різних умовах його пуску –

при різній тривалості пуску, при температурі навколишнього середовища від -50°C до -10°C та значеннях напруги в контактній мережі – 2,4...3,0 кВ.

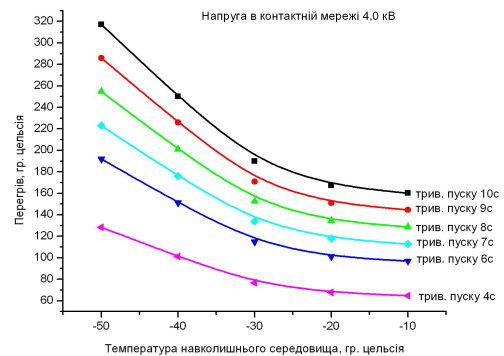


Рис. 6. Залежність величини перегріву ізоляції електродвигуна ДК – 406 від температури навколишнього середовища при різній тривалості пуску при напрузі в контактній мережі 4,0 кВ

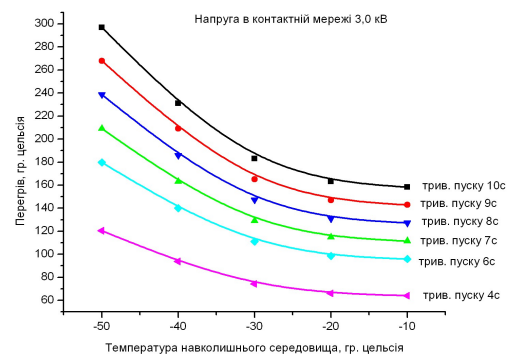


Рис. 7. Залежність величини перегріву ізоляції електродвигуна ДК – 406 від температури навколишнього середовища при різній тривалості пуску при напрузі в контактній мережі 3,0 кВ

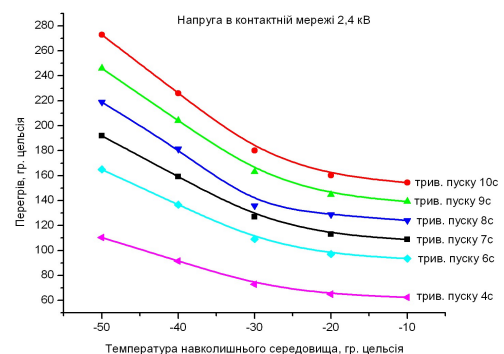


Рис. 8. Залежність величини перегріву ізоляції електродвигуна ДК – 406 від температури навколишнього середовища при різній тривалості пуску при напрузі в контактній мережі 2,4 кВ

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Вплив умов експлуатації на надійність двигунів компресорів електропоїздів постійного струму [Текст] / Л. В. Дубинець та ін. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 18. – Д.: вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007. – С. 29 – 31.
2. Подвижной состав электрических железных дорог: тяговые электромашины и трансформаторы [Текст]: / под общ. ред. Д. Д. Захарченко. – М.: Транспорт, 1968.- 295 с.
3. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин. Учебное пособие для вузов. [Текст] / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов – М.: Энергия, 1980. – 496с.
4. Костенко, М. П. Электрические машины: машины постоянного тока, трансформаторы. [Текст]. / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский – М.-Л.: Энергия, 1964, – 544 с.
5. Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ – 0063 [Текст]: Затв. і введено в дію наказом Міністерства транспорту України від 27.02.2003 р. № 53Ц / Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 2003. – 281 с.
6. Находкин, М. Д. Электрические машины постоянного тока. [Текст]: учебное пособие для вузов / М. Д. Находкин – М.: Высш. шк., 1960. – 325 с.
7. Дослідження перехідних процесів при пускові двигуна компресора електропоїзда EP2 (EP1) струму [Текст] / Л. В. Дубинець та ін. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 7. – С. 56 – 61.