

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО СТАНУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА У НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ

Квітка С. О., Вовк О. Ю., Квітка О. С.

Таврійський державний агротехнологічний університет

Обґрунтовано еквівалентну теплову схему та наведено математичну модель теплового стану асинхронного електродвигуна, що працює у нестационарних режимах.

Постановка проблеми. Тепловий стан електричного двигуна є ключовим щодо його працездатності в цілому. Достовірна інформація про поточний тепловий стан електродвигуна дозволяє забезпечити його захист від можливих аварійних режимів, які пов'язані з температурними змінами [2].

Широке розповсюдження в процесі дослідження теплового стану електричних машин отримав метод побудови теплової моделі з використанням еквівалентних теплових схем (ЕТС) [1, 3]. Як відомо, метод еквівалентних теплових схем використовується для визначення середніх температур вузлів ЕТС при стаціонарному тепловому стані. Проте, цей метод може бути використаний і у разі нестационарних теплових станів, що мають місце при роботі двигуна [1].

У тепловому відношенні електрична машина у нестационарному режимі є складним комплексом взаємозв'язаних елементів, процеси в якій описуються системою диференціальних рівнянь Пуассона в частинних похідних, при цьому взаємозв'язані граничні умови для цих рівнянь істотно ускладнюють рішення.

Якщо відмовитися від розгляду температурних полів усередині кожного окремо взятого елемента електричної машини, то нестационарний тепловий процес можна описати системою звичайних лінійних диференціальних рівнянь першого порядку. Їх число залежить від кількості тіл, на яку розбивається електрична машина. У нашому випадку кількість тіл дорівнює числу вузлів ЕТС. Для кожного тіла (вузла) складається диференціальне рівняння теплового балансу.

Тому необхідно обґрунтувати теплову модель асинхронного електродвигуна з використанням еквівалентної теплової схеми і на її основі розробити математичну модель теплового стану двигуна у нестационарному режимі роботи, яка дозволить досліджувати і контролювати його тепловий стан в процесі експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі еквівалентні теплові схеми асинхронного електродвигуна, які мають у своєму складі одне, два, або три тіла [3, 4], і використовуються для аналізу теплового стану двигуна в процесі його експлуатації, не дозволяють в повній мірі визначити тепловий стан окремих вузлів асинхронного електродвигуна (обмоток статора і ротора, магнітопроводу і підшипників). Найбільш відомі еквівалентні теплові схеми не враховують теплопередачі або через повітряний зазор від ротора до статора, або від лобових частин обмотки статора до повітря, або обидва ці шляхи [1, 3]. Отримати задовільні результати за такими неадекватними схемами можна тільки за рахунок певних умовностей

при розрахунку параметрів.

В докладних теплових схемах асинхронних електродвигунів кількість вузлів, а отже рівнянь теплового балансу, складає 11...20 і більше [1]. Однак автори [1] відзначають, що користуватися такими схемами з великою кількістю вузлів доцільно лише при проектуванні системи охолодження та при розрахунку порівняно великих електродвигунів. В практичних розрахунках асинхронних електродвигунів широко застосовуються спрощені еквівалентні теплові схеми з числом вузлів - джерел виділення тепла 6...10 [1, 3].

Мета статті. Метою даної роботи є обґрунтування теплової моделі асинхронного електродвигуна з використанням еквівалентної теплової схеми та розробка на її основі математичної моделі теплового стану двигуна у нестационарному режимі роботи, яка дозволить досліджувати і контролювати його тепловий стан в процесі експлуатації.

Основні матеріали дослідження. Розглянемо асинхронний електродвигун у тепловому відношенні як систему, що складається із шістьох тіл (рис. 1) [3]:

- 1) лобова частина обмотки статора;
- 2) пазова частина обмотки статора;
- 3) осердя статора;
- 4) внутрішнє повітря;
- 5) ротор (обмотка ротора);
- 6) корпус.

На схемі наведено наступні умовні позначення:

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ – теплоємності відповідних тіл електродвигуна, Дж/°С;

$\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, \Delta\theta_5, \Delta\theta_6$ – перевищення температур відповідних тіл електродвигуна над температурою навколишнього середовища, °С;

$\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3, \Delta P_4, \Delta P_5$ – втрати активної потужності у відповідних тілах електродвигуна, Вт;

$A_{12}, A_{14}, A_{23}, A_{35}, A_{36}, A_{45}, A_{46}$ – теплопровідності між відповідними тілами електродвигуна, Вт/°С;

A_{60} – теплопровідність між корпусом і навколишнім середовищем, Вт/°С;

C_B – теплоємність навколишнього середовища, Дж/°С;

θ_B – температура навколишнього середовища, °С.

Так як в схемі (рис. 1) розглянуті лобова і пазова частини обмотки статора окремо, а необхідно знати середнє перевищення температури обмотки, то за правилами еквівалентних перетворень [1] об'єднаємо ці джерела тепла в одне. Після певних перетворень отримаємо еквівалентну теплову схему, яка має п'ять тіл (рис. 2) [3].

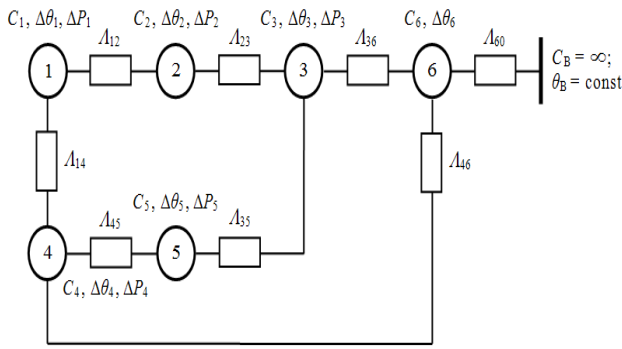


Рисунок 1 – Еквівалентна теплова схема асинхронного електродвигуна

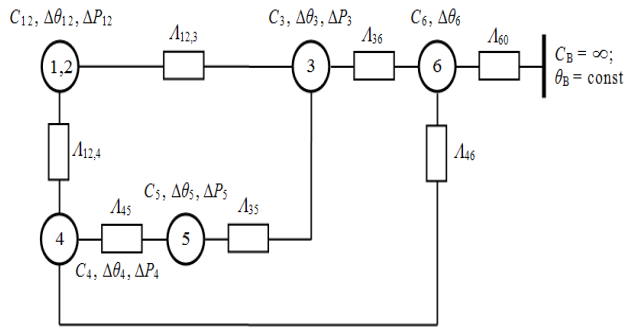


Рисунок 2 – Перетворена еквівалентна теплова схема асинхронного електродвигуна з об'єднаними пазовою і лобовою частинами обмотки

Тепловий процес асинхронного електродвигуна можна описати системою диференціальних рівнянь першого порядку. Їх число залежить від кількості тіл, на яке розбивається електрична машина. Складемо систему рівнянь теплового балансу для схеми, наведеної на рис. 1.

$$\begin{cases}
 C_1 d\Delta\theta_1/dt = -(\Lambda_{12} + \Lambda_{14})\Delta\theta_1 + \Lambda_{12}\Delta\theta_2 + \Lambda_{14}\Delta\theta_4 + \Delta P_1; \\
 C_2 d\Delta\theta_2/dt = -(\Lambda_{12} + \Lambda_{23})\Delta\theta_2 + \Lambda_{12}\Delta\theta_1 + \Lambda_{23}\Delta\theta_3 + \Delta P_2; \\
 C_3 d\Delta\theta_3/dt = -(\Lambda_{23} + \Lambda_{35} + \Lambda_{36})\Delta\theta_3 + \Lambda_{23}\Delta\theta_2 + \Lambda_{35}\Delta\theta_5 + \Lambda_{36}\Delta\theta_6 + \Delta P_3; \\
 C_4 d\Delta\theta_4/dt = -(\Lambda_{14} + \Lambda_{45} + \Lambda_{46})\Delta\theta_4 + \Lambda_{14}\Delta\theta_1 + \Lambda_{45}\Delta\theta_5 + \Lambda_{46}\Delta\theta_6 + \Delta P_4; \\
 C_5 d\Delta\theta_5/dt = -(\Lambda_{45} + \Lambda_{35})\Delta\theta_5 + \Lambda_{45}\Delta\theta_4 + \Lambda_{35}\Delta\theta_3 + \Delta P_5; \\
 C_6 d\Delta\theta_6/dt = -(\Lambda_{36} + \Lambda_{46} + \Lambda_{60})\Delta\theta_6 + \Lambda_{36}\Delta\theta_3 + \Lambda_{46}\Delta\theta_4.
 \end{cases} \quad (1)$$

Система рівнянь для схеми (рис. 2) має наступний вид:

$$\begin{cases}
 C_{12} d\Delta\theta_{12}/dt = -(\Lambda_{12,3} + \Lambda_{12,4})\Delta\theta_{12} + \Lambda_{12,3}\Delta\theta_3 + \Lambda_{12,4}\Delta\theta_4 + \Delta P_{12}; \\
 C_3 d\Delta\theta_3/dt = -(\Lambda_{12,3} + \Lambda_{35} + \Lambda_{36})\Delta\theta_3 + \Lambda_{12,3}\Delta\theta_{12} + \Lambda_{35}\Delta\theta_5 + \Lambda_{36}\Delta\theta_6 + \Delta P_3; \\
 C_4 d\Delta\theta_4/dt = -(\Lambda_{12,4} + \Lambda_{45} + \Lambda_{46})\Delta\theta_4 + \Lambda_{12,4}\Delta\theta_{12} + \Lambda_{45}\Delta\theta_5 + \Lambda_{46}\Delta\theta_6 + \Delta P_4; \\
 C_5 d\Delta\theta_5/dt = -(\Lambda_{45} + \Lambda_{35})\Delta\theta_5 + \Lambda_{45}\Delta\theta_4 + \Lambda_{35}\Delta\theta_3 + \Delta P_5; \\
 C_6 d\Delta\theta_6/dt = -(\Lambda_{36} + \Lambda_{46} + \Lambda_{60})\Delta\theta_6 + \Lambda_{36}\Delta\theta_3 + \Lambda_{46}\Delta\theta_4.
 \end{cases} \quad (2)$$

$$(\Lambda_{12,3} + \Lambda_{12,4}) = \Lambda_{11};$$

$$(\Lambda_{12,3} + \Lambda_{35} + \Lambda_{36}) = \Lambda_{22};$$

$$(\Lambda_{12,4} + \Lambda_{45} + \Lambda_{46}) = \Lambda_{33};$$

$$(\Lambda_{45} + \Lambda_{35}) = \Lambda_{44};$$

$$(\Lambda_{36} + \Lambda_{46} + \Lambda_{60}) = \Lambda_{55}.$$

Введемо позначення:

$$(\Lambda_{12,3} + \Lambda_{12,4}) = \Lambda_{11};$$

$$(\Lambda_{12,3} + \Lambda_{35} + \Lambda_{36}) = \Lambda_{22};$$

$$(\Lambda_{12,4} + \Lambda_{45} + \Lambda_{46}) = \Lambda_{33};$$

$$(\Lambda_{45} + \Lambda_{35}) = \Lambda_{44};$$

$$(\Lambda_{36} + \Lambda_{46} + \Lambda_{60}) = \Lambda_{55}.$$

З урахуванням проведених перетворень і введених позначень система рівнянь (2) для нестационарного теплового режиму асинхронного електродвигуна має вид:

$$\begin{cases}
 C_{12} d\Delta\theta_{12}/dt = -\Lambda_{11}\Delta\theta_{12} + \Lambda_{12,3}\Delta\theta_3 + \Lambda_{12,4}\Delta\theta_4 + \Delta P_{12}; \\
 C_3 d\Delta\theta_3/dt = -\Lambda_{22}\Delta\theta_3 + \Lambda_{12,3}\Delta\theta_{12} + \Lambda_{35}\Delta\theta_5 + \Lambda_{36}\Delta\theta_6 + \Delta P_3; \\
 C_4 d\Delta\theta_4/dt = -\Lambda_{33}\Delta\theta_4 + \Lambda_{12,4}\Delta\theta_{12} + \Lambda_{45}\Delta\theta_5 + \Lambda_{46}\Delta\theta_6 + \Delta P_4; \\
 C_5 d\Delta\theta_5/dt = -\Lambda_{44}\Delta\theta_5 + \Lambda_{45}\Delta\theta_4 + \Lambda_{35}\Delta\theta_3 + \Delta P_5; \\
 C_6 d\Delta\theta_6/dt = -\Lambda_{55}\Delta\theta_6 + \Lambda_{36}\Delta\theta_3 + \Lambda_{46}\Delta\theta_4.
 \end{cases} \quad (3)$$

В результаті розрахунків отримані наступні значення теплоємностей елементів асинхронного електродвигуна 4AM112M4У3 із ступенем захисту IP44:

- теплоємність міді обмотки статора $C_{12} = 1389,8$ Дж/К;

- теплоємність сталі осердя статора $C_3 = 5670$ Дж/К;

- теплоємність внутрішнього повітря $C_4 = 4,1$ Дж/К;

- теплоємність ротора $C_5 = 5446,1$ Дж/К;

- теплоємність корпусу $C_6 = 14785,2$ Дж/К.

Результати розрахунків теплових провідностей еквівалентної теплової схеми (рис. 1, рис. 2):

- теплова провідність між корпусом і охолоджуючим повітряним потоком $\Lambda_{60} = 33,7838$ Вт/К;

- теплова провідність між лобовою і пазовою частинами обмотки статора $A_{12} = 22,5734$ Вт/К;
- теплова провідність між пазовою частиною обмотки статора і осердям статора $A_{23} = 23,1481$ Вт/К;
- теплова провідність між осердям статора і корпусом $A_{36} = 34,965$ Вт/К;
- теплова провідність між лобовими частинами обмотки статора і внутрішнім повітрям $A_{14} = 14,7275$ Вт/К;
- теплова провідність між внутрішнім повітрям і корпусом $A_{46} = 14,0647$ Вт/К;
- теплова провідність між ротором і статором $A_{35} = 6,402$ Вт/К;
- теплова провідність між ротором і внутрішнім повітрям $A_{45} = 6,0864$ Вт/К;
- теплова провідність між обмоткою статора і осердям статора $A_{12,3} = 16,0$ Вт/К;
- теплова провідність між обмоткою статора і внутрішнім повітрям $A_{12,4} = 10,7758$ Вт/К.

Математична модель теплового стану досліджуваного асинхронного електродвигуна у нестационарних режимах, яка представляє собою систему диференціальних рівнянь (3), з урахуванням визначених теплоємностей і теплових провідностей, буде мати вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1389,8 \cdot \frac{d\Delta\theta_{12}}{dt} = -26,7758 \cdot \Delta\theta_{12} + 16 \cdot \Delta\theta_3 + \\ + 10,7758 \cdot \Delta\theta_4 + \Delta P_{12}; \\ 5670 \cdot \frac{d\Delta\theta_3}{dt} = -57,367 \cdot \Delta\theta_3 + 16 \cdot \Delta\theta_{12} + 6,402 \cdot \Delta\theta_5 + \\ + 34,965 \cdot \Delta\theta_6 + \Delta P_3; \\ 4,1 \cdot \frac{d\Delta\theta_4}{dt} = -30,9269 \cdot \Delta\theta_4 + 10,7758 \cdot \Delta\theta_{12} + \\ + 6,0864 \cdot \Delta\theta_5 + 14,0647 \cdot \Delta\theta_6 + \Delta P_4; \\ 5446,1 \cdot \frac{d\Delta\theta_5}{dt} = -12,4884 \cdot \Delta\theta_5 + 6,0864 \cdot \Delta\theta_4 + \\ + 6,402 \cdot \Delta\theta_3 + \Delta P_5; \\ 14785,2 \cdot \frac{d\Delta\theta_6}{dt} = -82,8135 \cdot \Delta\theta_6 + 34,965 \cdot \Delta\theta_3 + \\ + 14,0647 \cdot \Delta\theta_4. \end{array} \right. \quad (4)$$

Висновки. Отримана математична модель теплового стану описує температурні режими асинхронного електродвигуна 4AM112M4У3 у нестационарних режимах роботи і найбільш точно відображає перевищення температури в його окремих частинах. Дана модель дає результати, які відрізняються від результатів отриманих експериментальним шляхом не більше 5 %.

Таким чином, еквівалентна теплова схема і математична модель теплового стану асинхронного двигуна у нестационарних режимах роботи адекватно відображає фізичні процеси, що відбуваються в електродвигуні закритого виконання з природним охолодженням.

Отримана еквівалентна теплова схема і математична модель дозволяють оцінити тепловий стан основних елементів асинхронного електродвигуна у нестационарних режимах роботи, проводити аналіз зміни

теплового стану при зміні втрат в електродвигуні.

Список використаних джерел

1. Сипайлов Г. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах : учеб. для вузов / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М. : Высш. шк., 1989. – 239 с.
2. Бешта А. С. Диагностика теплового состояния асинхронного двигателя / А. С. Бешта [и др.] // Сб. науч. тр. Днепропетровского государственного технического университета (технические науки). Тематический выпуск "Проблемы автоматизированного электропривода". Теория и практика. – Днепропетровск: ДГТУ, 2007. – С. 469-472.
3. Квітка С. О. Теплова модель асинхронного електродвигуна в стаціонарних режимах / С. О. Квітка, О. Ю. Вовк, О. С. Квітка // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. – Вип. 164. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – С. 118-120.
4. Вовк О. Ю. Аналітичне порівняння методів визначення усталеного перевищення температури обмоток статора асинхронного електродвигуна / О. Ю. Вовк, С. О. Квітка, В. Ф. Яковлев // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія "Механізація та автоматизація виробничих процесів". – Суми : СНАУ, 2011. – №8(23). – С.114–116.
5. Гольдберг О. Д. Проектирование электрических машин : учеб. для вузов / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко ; Под ред. О. Д. Гольдберга. – М.: Высшая школа, 2001. – 430 с.

Аннотация

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ

Квитка С. А., Вовк А. Ю., Квитка А. С.

Обоснована еквівалентна теплова схема и представлена математическая модель теплового состояния асинхронного электродвигателя работающего в нестационарных режимах.

Abstract

MATHEMATICAL MODEL OF THE THERMAL STATE OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR IN NON-STATIONARY MODES

S. Kvitka, A. Vovk, A. Kvitka

Equivalent heat diagram is substantiated as well as mathematical model is presented. The model describes the heat state of an asynchronous motor, while working in non-stationary modes.