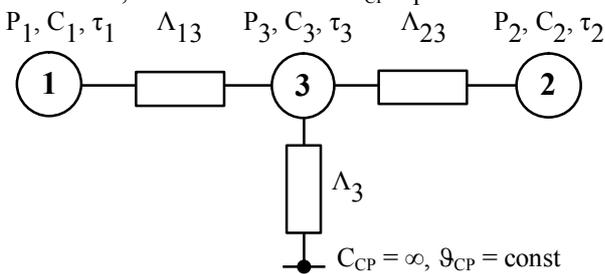


ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА БАЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Введение. Опыт эксплуатации трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором как основного элемента электропривода свидетельствует об их высокой аварийности, что приводит к дополнительным убыткам предприятий. В этой связи исследования направленные на дальнейшую разработку методов и средств диагностирования режимов работы и защиты асинхронных двигателей, остаются актуальными.

Перспективным является диагностирование режимов работы электродвигателя на базе математической модели тепловых процессов [1]. В основе данной модели лежит эквивалентная тепловая схема замещения асинхронного двигателя как системы трех тел, представленная на рис. 1. Обмотка статора и сталь связаны тепловой проводимостью Λ_{13} , ротор и сталь – Λ_{23} , сталь и окружающая среда – Λ_3 . Каждое тело обладает соответствующей теплоемкостью C_1, C_2, C_3 , и в них выделяются потери мощности P_1, P_2, P_3 . Превышения температуры, соответственно, обмотки статора, ротора и стали двигателя – τ_1, τ_2 и τ_3 . Температура окружающей среды ϑ_{CP} принята постоянной, а ее теплоемкость C_{CP} – равной бесконечности.



Уравнения теплового баланса для каждого тела асинхронного двигателя имеют вид [1]:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{N}_1 \frac{d\tau_1}{dt} + \Lambda_{13} (\tau_1 - \tau_3) &= P_{10} (1 + \alpha\tau_1); \\ C_2 \frac{d\tau_2}{dt} + \Lambda_{23} (\tau_2 - \tau_3) &= P_2; \\ C_3 \frac{d\tau_3}{dt} + \Lambda_{13} (\tau_3 - \tau_1) + \Lambda_{23} (\tau_3 - \tau_2) + \Lambda_3 \tau_3 &= P_3. \end{aligned} \right\} (1)$$

Рис.1. Тепловая схема замещения асинхронного двигателя как системы трех тел: обмотки статора (1), ротора (2), стали (3).

где P_{10} – потери активной мощности в обмотке статора при температуре окружающей среды, Вт;
 α – температурный коэффициент сопротивления материала обмотки, $1/^\circ\text{C}$.

Постановка задач исследования. Определение пассивных параметров эквивалентной тепловой схемы (теплоемкостей и тепловых проводимостей) расчетным способом затруднительно в силу сложности конфигурации конструктивных элементов, широкого разнообразия характеристик изоляционных и активных материалов двигателя [2, 3]. Поэтому задачей исследования является разработка методики определения указанных параметров тепловой схемы замещения на базе экспериментальных данных.

Материалы исследования. Тепловые проводимости ($\Lambda_{13}, \Lambda_{23}, \Lambda_3$) определяются из опыта холостого хода. При этом в обмотке, роторе и стали выделяются потери P_{1X}, P_{2X} и P_{3X} соответственно, а установившиеся значения превышений температуры составляют τ_{1X}, τ_{2X} и τ_{3X} .

Система уравнений (1) в установившемся тепловом режиме холостого хода примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_{13} (\tau_{1X} - \tau_{3X}) &= P_{10X} (1 + \alpha\tau_{1X}); \\ \Lambda_{23} (\tau_{2X} - \tau_{3X}) &= P_{2X}; \\ \Lambda_{13} (\tau_{3X} - \tau_{1X}) + \Lambda_{23} (\tau_{3X} - \tau_{2X}) + \Lambda_3 \tau_{3X} &= P_{3X}. \end{aligned} \right\} (2)$$

Из этой системы определяем

$$\Lambda_{13} = \frac{P_{10X} (1 + \alpha\tau_{1X})}{\tau_{1X} - \tau_{3X}}, \quad \Lambda_{23} = \frac{P_{2X}}{\tau_{2X} - \tau_{3X}}, \quad \Lambda_3 = \frac{P_{10X} (1 + \alpha\tau_{1X}) + P_{2X} + P_{3X}}{\tau_{3X}}. \quad (3)$$

Теплоемкости стали двигателя (C_3) и обмотки (C_1) определим на основе анализа динамики их нагрева и охлаждения. Из уравнений теплового баланса стали и обмотки (1), записанных в начальный момент ($t = 0$) нагрева и охлаждения, соответственно получаем

$$C_3 = \frac{P_3}{\frac{d\tau_3}{dt}(0)}, \quad \tilde{N}_1 = \frac{\Lambda_{13} (\tau_{3X} - \tau_{1X})}{\frac{d\tau_{10X}}{dt}(0)}, \quad (4)$$

где $\frac{dT_3(0)}{dt}$ – скорость нарастания температуры стали в начальный момент нагрева, °C/c, $\frac{dT_{10X}(0)}{dt}$ – скорость

изменения температуры обмотки в начальный момент охлаждения, °C/c.

Теплоемкости узлов электрической машины можно также определить по следующему выражению:

$$C_i = c_i \cdot m_i, \quad (5)$$

где c_i – удельная теплоемкость i -го тела, Дж/(кг · °C); m_i – масса i -го тела, кг.

Масса ротора определяется как

$$m_2 = m_{\text{дв}} - m_1 - m_3, \quad (6)$$

где $m_{\text{дв}}$ – масса двигателя, кг.

С учетом выражений (5) и (6) теплоемкость ротора определяется как

$$C_2 = c_2 \left(m_{\text{дв}} - \frac{C_1}{c_1} - \frac{C_3}{c_3} \right). \quad (7)$$

В электрических машинах с самовентиляцией при неподвижном роторе обдув частей электрической машины отсутствует, что приводит к ухудшению охлаждения машины. Для учета данного фактора следует определить значение тепловой проводимости от стали к окружающей среде при неподвижном роторе Λ'_3 . Из кривой охлаждения стали в начальный момент времени получаем

$$\Lambda'_3 = \frac{C_3 \frac{dT_{3OX}(0)}{dt} + \Lambda_{13} (\tau_{3X} - \tau_{1X}) + \Lambda_{23} (\tau_{3X} - \tau_{2X})}{-\tau_{3X}}, \quad (8)$$

где $\frac{dT_{3OX}(0)}{dt}$ – скорость изменения температуры стали в начальный момент охлаждения, °C/c.

Производные температур обмотки и стали определяются путем численного дифференцирования кривых нагрева и охлаждения, полученных экспериментальным путем. Вычисление производных выполняем методом одностороннего дифференцирования многочлена Ньютона [4]:

$$\frac{dT(0)}{dt} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{(-1)^{j-1}}{j} \Delta^j \tau_{(0)}, \quad (9)$$

$$\text{где } \Delta^j \tau_{(i)} = \Delta^{j-1} \tau_{(i+1)} - \Delta^{j-1} \tau_{(i)}. \quad (10)$$

Экспериментальное исследование с целью определения количественных значений теплоемкостей и тепловых проводимостей проводилось на базе асинхронного двигателя основного исполнения 4A90L4Y3 номинальной мощностью 2,2 кВт. Температура обмотки измерялась методом сопротивлений на основе разницы омического сопротивления фаз обмотки статора в холодном и нагретом состоянии. Превышение температуры ротора, в соответствии с ГОСТ 25941-83, определялось по изменению скольжения в холодном и нагретом состояниях. Для измерения температуры стали в верхние слои магнитопровода были установлены терморезисторы с отрицательным коэффициентом сопротивления.

В результате выполнения измерений получены следующие значения величин:

– превышения температур тел двигателя $\tau_{1X} = 29,6$ °C; $\tau_{2X} = 27,1$ °C; $\tau_{3X} = 17,6$ °C;

– потери активной мощности в телах двигателя $P_{10X} = 103,7$ Вт; $P_{2X} = 18,1$ Вт; $P_{3X} = 127,4$ Вт;

– скорости изменения температур $\frac{dT_3(0)}{dt} = 0,01311$ °C/c; $\frac{dT_{10X}(0)}{dt} = -0,1552$ °C/c; $\frac{dT_{3OX}(0)}{dt} = -0,001642$ °C/c.

Результаты расчета параметров схемы замещения:

– тепловые проводимости $\Lambda_{13} = 9,742$ Вт/°C; $\Lambda_{23} = 1,905$ Вт/°C; $\Lambda_3 = 14,909$ Вт/°C; $\Lambda'_3 = 8,577$ Вт/°C;

– теплоемкости $C_1 = 753$ Дж/°C; $C_2 = 3131$ Дж/°C; $C_3 = 9718$ Дж/°C.

Выводы. Таким образом, теплоемкости тел определяются конструктивными параметрами двигателя, а для расчета тепловых проводимостей необходимо определить установившиеся превышения температур и потери мощности в обмотке, роторе и стали при холостом ходе.

Литература.

1. Овчаров В.В., Рижков А.О. Діагностування експлуатаційних режимів роботи і захист асинхронного двигуна за температурою сталі та кратністю сили струму // Наукові доповіді НАУ, 2006. – № 4(5). – 8 с., <http://www.nbu.gov.ua/e-Journals/nd/2006-4/06ovvacr.pdf>
2. Борисенко А.И. и др. Охлаждение промышленных электрических машин / А.И. Борисенко, О.Н. Костиков, А.И. Яковлев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
3. Сипайлов Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: Учеб. для вузов по спец. "Электромеханика" / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.
4. Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л. Численные методы. – М.: Физматлит, 2004. – 400 с.