

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.313.333

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2011 г. М.Ю. Петушков

Магнитогорский государственный
технический университетMagnitogorsk State
Technical University

Предлагается рассматривать тепловую модель асинхронного двигателя трехмассовой. Сравниваются результаты, рассчитанные на модели, и данные, полученные экспериментально. Разработанная модель адекватно отражает тепловые процессы в асинхронных двигателях и может быть использована для дальнейших исследований.

Ключевые слова: тепловая модель; асинхронный двигатель; коэффициент теплоотдачи; поверхность нагрева; теплопроводность.

It is suggested to consider the thermal model of an asynchronous motor as a three-mass one. The author compares the results calculated on the model and experimental data and concludes that the developed model adequately reflects thermal processes in asynchronous motors and can be used for further research.

Keywords: thermal model; asynchronous motor; coefficient of heat transfer; heating surface; heat conductivity.

Работа асинхронных двигателей сопровождается необратимыми потерями электрической и механической энергии, проявляющимися в виде теплоты, выделение которой в активных частях нарушает тепловую однородность машины. Это ведет к перетоку теплоты от активных частей к элементам конструкции и внешней среде, так что АД является не только электро-механической, но и тепловой системой. Для надежной и продолжительной работы электродвигателя нагревание любой его части должно ограничиваться определенными пределами [1].

Температура частей электрической машины зависит от температуры окружающей среды. В связи с неизбежными колебаниями температуры окружающей среды для двигателей нормируется не допустимая температура различных частей электромашины, а предельно допустимое превышение температуры этих частей над температурой окружающей среды [2]

$$\tau = \Theta - \Theta_{\text{oc}},$$

где Θ – температура рассматриваемой части электродвигателя; Θ_{oc} – температура окружающей среды.

Если в стандартах или технических условиях на электродвигатель не указаны другие требования, то значение температуры окружающей среды обычно принимается 40 °С.

Наиболее уязвимой к тепловым нагрузкам является изоляция обмоток асинхронного двигателя, так как изолирующие материалы приходят в негодность уже при относительно невысоких температурах. Повышенная температура вызывает тепловое старение изоляции обмоток, что приводит к снижению электрической и механической прочности. Поэтому до-

пускаемая нагрузка электродвигателя определяется, прежде всего, допускаемой температурой для применяемых в нем изолирующих материалов [3].

Следует отметить, что для обмоток электродвигателей существует так называемое правило «десяти градусов»: превышение допустимой температуры нагрева на 10 °С сокращает срок службы изоляции вдвое [4].

Условия нагрева отдельных частей асинхронного двигателя различны. Большему нагреву подвергаются части обмоток, расположенные во внутренних областях машины. Так же неодинаково и выделение теплоты в различных режимах работы, и поэтому направление тепловых потоков внутри двигателя непостоянно. При холостом ходе теплота передается от более нагретой стали двигателя к его обмоткам, а в нагруженном состоянии обмотки более нагреты, чем сталь, и направление теплового потока обратное [2].

В практике тепловых расчетов электрических машин для решения общей задачи нагрева достаточно широко применяют метод эквивалентных тепловых схем [1, 4]. Согласно данному методу, рассматриваемую машину или ее часть разделяют на отдельные тела или элементы, в той или иной степени однородные (по материалу, условиям выделения потерь, характеру контакта с соседними элементами или средой). Точность решения возрастает при увеличении количества тел тепловой схемы. При этом необходимо помнить, что точность теплового расчета определяется не только количеством тел, но в большей степени зависит от точности определения коэффициентов теплоотдачи с поверхности нагрева, теплопроводности выбранных материалов и других факторов, вно-

сящих неопределенность в исходные данные. Поэтому достаточно часто для определения теплового состояния отдельных частей или всей машины используют упрощенные тепловые схемы замещения с малым количеством тел.

Наиболее простой является тепловая модель, согласно которой двигатель представляется одним телом нагрева или дифференциальным уравнением первого порядка (уравнение теплового баланса) [5]:

$$C \frac{d\tau}{dt} = \Delta P - A\tau, \quad (1)$$

где τ – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды; ΔP – потери мощности в двигателе; C – суммарная теплоемкость двигателя; A – тепловая проводимость (теплопроводность).

Однако этот подход оправдывает себя только в случае длительных режимов работы электродвигателя, когда нагрузка меняется незначительно и, следовательно, определяющей величиной является установившееся значение превышения температуры, а не динамика процесса. При продолжительности включения менее 30 мин расчет нагрева данным способом значительно расходится с характером фактического нагрева обмотки.

В соответствии с рабочими тахограммами длительность режимов разгона может составлять и 50, и 300 с. Следовательно, для корректной оценки теплового состояния АД модель, состоящая из одного тела, не подходит.

Достаточно точные результаты можно получить при использовании тепловой модели двигателя, состоящей из трех тел: первое представляет собой обмотки статора, второе – сталь статора и станина, третье – ротор [6]. Эквивалентная тепловая схема замещения асинхронного двигателя для этого случая представлена на рис. 1.

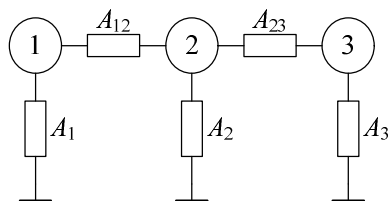


Рис. 1. Тепловая схема замещения асинхронного двигателя

Система дифференциальных уравнений, описывающая тепловое состояние электродвигателя в соответствии с рис. 1? имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{d\tau_1}{dt} &= \Delta P_1 - A_1\tau_1 - A_{12}(\tau_1 - \tau_2); \\ C_2 \frac{d\tau_2}{dt} &= \Delta P_2 - A_2\tau_2 + A_{12}(\tau_1 - \tau_2) + A_{23}(\tau_3 - \tau_2); \\ C_3 \frac{d\tau_3}{dt} &= \Delta P_3 - A_3\tau_3 - A_{23}(\tau_3 - \tau_2). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Обозначения аналогичны уравнению с одним телом нагрева (1): τ_1, τ_2, τ_3 – превышение температуры,

соответственно, обмотки статора, стали и ротора над температурой окружающей среды; $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$ – потери мощности в соответствующих телах; C_1, C_2, C_3 – суммарные теплоемкости соответствующих тел; A_1, A_2, A_3 – тепловая проводимость соответственно от обмоток статора, стали и ротора в окружающую среду; A_{12}, A_{23} – тепловая проводимость между соответствующими телами.

Для выполнения расчетов по приведенной системе уравнений необходимо определить все параметры модели, т.е. теплоемкости, тепловые проводимости и составляющие потерь.

Теплоемкость обмотки статора определим по формуле $C_1 = c_1 m_1$, где c_1 – удельная теплоемкость меди, m_1 – масса обмотки.

Теплоемкость стали найдем аналогично исходя из ее геометрических размеров

$$C_2 = c_2 m_2 = c_2 \rho_2 \frac{\pi l (D - d)^2}{4},$$

где c_2 – удельная теплоемкость стали; m_2 – масса сердечника; ρ_2 – плотность стали; D, d – соответственно внешний и внутренний диаметр статора; l – длина сердечника статора.

Теплоемкость ротора $C_3 = c_3 (m_{\text{дв}} - m_1 - m_2)$, где c_3 – удельная теплоемкость ротора; $m_{\text{дв}}$ – масса двигателя.

Потери мощности в обмотке статора трехфазных АД определяются квадратом тока и сопротивлением независимо от схемы соединения обмоток:

$$\Delta P_1 = 3i_s^2 R_s. \quad (3)$$

С учетом того, что сопротивление обмотки зависит от ее температуры, выражение (3) примет окончательный вид:

$$\Delta P_1 = 3i_s^2 R_s [1 + \gamma(\tau_1 - 20)], \quad (4)$$

где γ – температурный коэффициент сопротивления (для меди $\gamma = 0,004^\circ\text{C}^{-1}$).

Потери мощности в стали статора связаны с перемагничиванием от основного потока асинхронного двигателя и определяются формулой [1]

$$\Delta P_2 = k_n p_{1/50} \left(\frac{f_c}{50} \right)^{1,3} B^2 m_2, \quad (5)$$

где k_n – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения потока по сечению магнитопровода; $p_{1/50}$ – удельные потери в стали при индукции 1 Тл и частоте сети 50 Гц; B – среднее значение индукции.

Потери в роторе складываются из магнитных потерь в стали ротора и электрических потерь в его обмотке. Наибольшими потерями в пусковых режимах являются электрические потери в обмотках. Они во много раз превышают потери номинального режима, поэтому пренебрежение потерями в стали ротора при больших скольжениях не вносит скольконибудь заметной погрешности в расчет. В соответст-

вии с этим потери мощности в роторе определяются аналогично (4):

$$\Delta P_3 = 3i_r^2 R_r [1 + \gamma(\tau_3 - 20)]. \quad (6)$$

Расчет значений тепловой проводимости между телами модели производится на основе обмоточных данных, геометрических размеров, свойств материалов статора, ротора и других параметров в соответствии с методиками расчетов, приведенными в [1, 4], и здесь подробно не приводится.

На рис. 2 представлена структурная схема тепловой модели АД, построенная согласно выражениям (2), (4) – (6) в пакете *Simulink*.

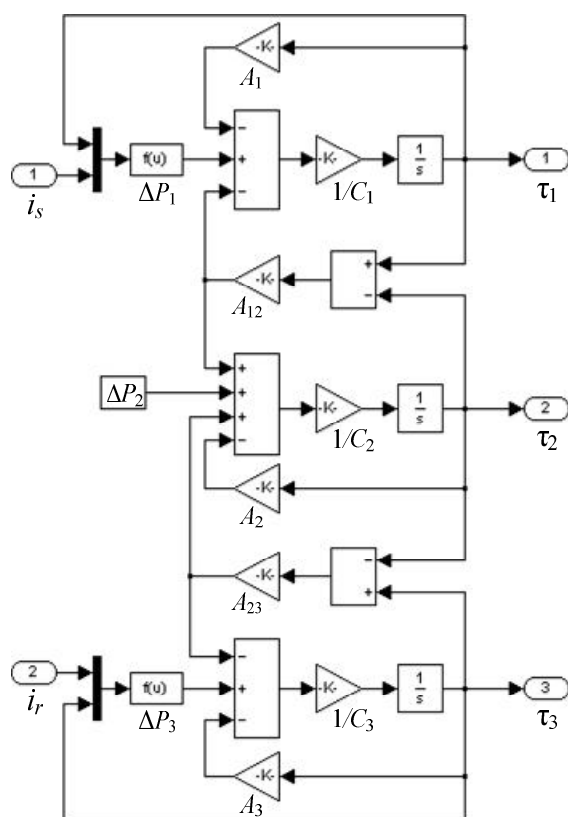


Рис. 2. Структурная схема тепловой модели АД, состоящей из трех тел

Проверка адекватности тепловой модели АД производилась следующим образом: на модели были рассчитаны тепловые процессы в нескольких двигателях серии 5А. Далее полученные результаты (таблица) сравнили с аналогичными, указанными в [7]. Расхождение значений главным образом связано с точностью

определения основных параметров тепловой модели (теплоемкостей и тепловых проводимостей).

Превышение температуры обмотки статора в АД серии 5А

Тип двигателя	Превышение температуры обмотки статора, °С		Ошибка, %
	приведенное в [7]	рассчитанное на модели	
5АН225М4	52,2	54,5	4,4
5АН225М6	50	52,4	4,8
5АН250М6	54	55,7	3,1
5АН250С8	59,9	61,9	3,3
5АН250М8	60	62,7	4,5

На основании анализа представленных в таблице данных можно заключить, что построенная модель адекватно отражает тепловые процессы в асинхронных двигателях и может быть использована для дальнейших исследований.

Статья подготовлена по материалам НИИР, выполняемой в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2012 годы» по контракту ГК НК-66(7) № П232.

Литература

1. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. М., 1983. 296 с.
2. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: учебник для вузов. М., 1981. 576 с.
3. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Л., 1973. 648 с.
4. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. М., 1989. 239 с.
5. Синчук О.Н., Чумак В.В., Михайлов С.Л. Тепловая модель кранового АД для диагностирования и настройки цифровой защиты от перегрузок // Электротехника. 2003. № 3. С. 61 – 65.
6. Электропривод машины центробежного литья валков по системе ТПН-АД / А.С. Сарваров [и др.]. Магнитогорск, 2010. 134 с.
7. Беспалов В.Я., Мощинский Ю.А., Цуканов В.И. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя // Электричество. 2003. № 4. С. 20 – 26.

Поступила в редакцию

28 февраля 2011 г.

Петушков Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет. Тел. 8(3519)419-520. E-mail: petushkov_m@mail.ru

Petushkov Michail Yurievich – Candidate of Technical Sciences, professor, Magnitogorsk State Technical University. Ph. 8(3519)419-520. E-mail: petushkov_m@mail.ru