

ДИАГНОСТИКА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Постановка задачи. Вопрос о тепловом состоянии электрического двигателя является ключевым вопросом работоспособности электропривода в целом. При выборе электропривода для повышения КПД следует максимально приближать его установленную мощность к эквивалентной нагрузке. Кроме того, в условиях работы, когда нагрузка электропривода изменяется произвольным образом, особенно важным является контроль температуры наиболее нагретых частей обмоток электродвигателя.

Достоверная информация о текущем тепловом состоянии электродвигателя позволяет обеспечить, в первую очередь, защиту электродвигателя от возможных аварийных режимов, связанных с температурными изменениями. На стадии разработки нового электродвигателя или во время модернизации (изменения) отдельных узлов необходима информация о том, как эти работы повлияют на температурное состояние его обмоток.

При выборе асинхронного электродвигателя и проверке его по нагреву оперируют такими понятиями, как допустимое число включений в час, допустимая температура нагрева обмоток, механическая прочность и долговечность витковой изоляции. Перечисленные параметры могут существенно изменяться в зависимости от режима работы электродвигателя и конструкции электрической машины. Нагрев обмоток зависит от величины нагрузки, уровня потерь в переходных режимах, тепловых характеристик материалов частей электрической машины, способа и качества охлаждения. В процессе эксплуатации электрической машины в составе электропривода, особенно при различных повторно-кратковременных режимах работы с возможным кратковременным превышением номинальной нагрузки, целесообразен постоянный мониторинг теплового состояния обмоток электродвигателя. Поскольку в реальных условиях контроль температуры обмоток затруднен, оптимальное решение видится в косвенном определении температуры наиболее нагретых частей обмотки электрической машины по текущей температуре в одной из ее частей, где доступно установление датчика температуры. Такая постановка задачи не нова, однако, вопрос заключается в том, где наиболее целесообразно устанавливать датчик температуры, учитывая при этом технологические возможности, стоимостные показатели как электродвигателя, так и системы в целом.

Широкое распространение в процессе исследования теплового состояния электрических машин получили методы построения тепловой модели с использованием эквивалентных тепловых расчетных схем замещения. При этом составляется система уравнений, которая учитывает тепловое взаимодействие источников тепловыделения в узлах электрической машины. Однако одна и та же конструкция электрической машины может быть представлена различными тепловыми схемами, отличающимися степенью детализации возможных путей протекания тепловых потоков. Основную проблему составляет точное определение тепловых сопротивлений между элементами конструкции, в которых происходит выделение тепла, и окружающей средой. Дополнительные трудности при определении тепловых сопротивлений возникают при учете условий работы электродвигателя от частотного преобразователя с изменяемой скоростью вращения ротора.

Теоретические расчеты, которые, несомненно, представляют интерес с научной точки зрения и позволяют учесть большое количество параметров машины, её исполнение по способу охлаждения и распределение температур по объему машины, не всегда пригодны для практического использования, так как требуют знания большого количества параметров конструкции машины и применяемых материалов. С практической точки зрения оптимальной является тепловая модель, в которой все параметры могут быть взяты из паспорта электродвигателя или получены путем геометрических измерений непосредственно на машине. Целью настоящей работы является получение упрощенной тепловой модели и проверка ее адекватности путем проведения дополнительных экспериментальных исследований на испытательных стендах.

Решение задачи. Рассмотрим исходную тепловую модель электродвигателя с самовентиляцией, учитывающую несимметричное распределение тепловых потоков в машине (рис. 1). Данная модель позволяет произвести вычисление температуры в 16 узлах машины. Для определения неизвестных температур составляется система уравнений тепловой модели (1), которая решается одним из известных способов, например матричным способом:

$$\begin{bmatrix} T_0 \\ T_1 \\ T_2 \\ \cdot \\ T_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_{0,0} & \lambda_{0,1} & \lambda_{0,2} & \cdot & \lambda_{0,m} \\ \lambda_{1,0} & \lambda_{1,1} & \lambda_{1,2} & \cdot & \lambda_{1,m} \\ \lambda_{2,0} & \lambda_{2,1} & \lambda_{2,2} & \cdot & \lambda_{2,m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \lambda_{n,0} & \lambda_{n,1} & \lambda_{n,2} & \cdot & \lambda_{n,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_0 \\ \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \cdot \\ \Delta P_n \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\lambda_{n,m} = 1/R_{n,m}$

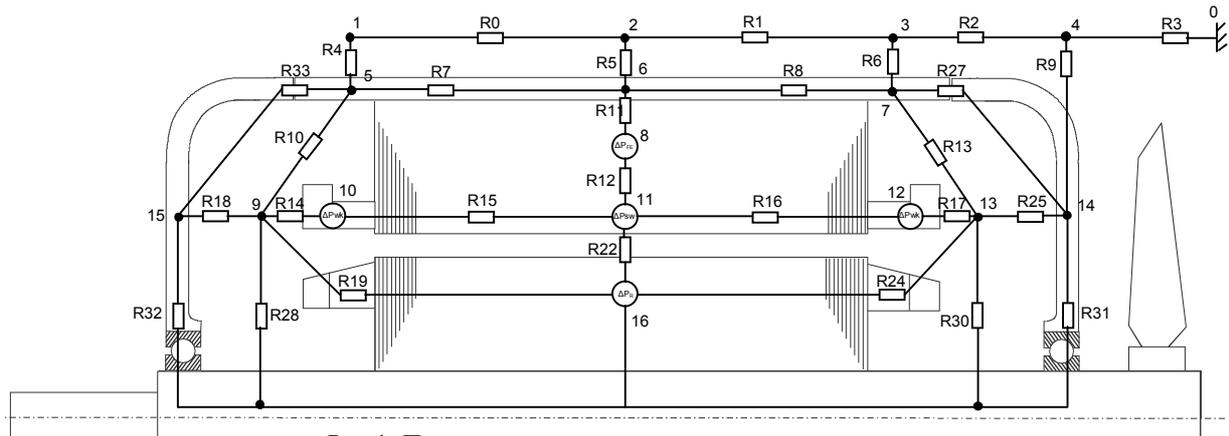


Рис. 1. Полная тепловая модель электродвигателя

Однако выполнить экспериментальную проверку полученных результатов путем прямого измерения во многих узлах не представляется возможным по техническим причинам. Поэтому данная тепловая модель была упрощена путем взаимного поглощения и зачета тепловых сопротивлений и узлов к виду, представленному на рис.2. На рисунке приняты следующие обозначения:

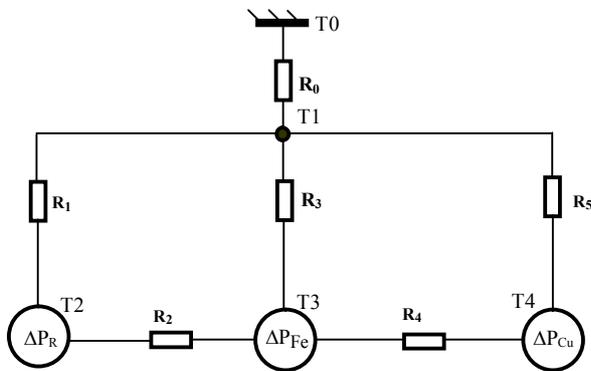


Рис. 2. Упрощенная тепловая модель электродвигателя

T_0 – температура окружающей среды; T_1 – температура корпуса; T_2 – температура ротора; T_3 – температура стали статора; T_4 – температура обмотки статора; R_0-R_5 – тепловые сопротивления между соответствующими узлами машины; ΔP_R – потери в роторе; ΔP_{Fe} – потери в стали статора; ΔP_{Cu} – потери в меди статора. Приведенные на этой схеме температуры могут быть получены путем непосредственных измерений на испытательном стенде, а тепловые сопротивления вычислены по геометрии машины.

Упрощенная тепловая модель может быть описана системой уравнений (2), решение которой позволяет определить искомые температуры. Значения потерь и тепловых сопротивлений получены для установившегося режима работы электрического двигателя при номинальной нагрузке.

$$\begin{aligned}
 T_0 \cdot \lambda_0 - T_1 &= \sum P; \\
 T_1 \cdot (\lambda_1 + \lambda_0 + \lambda_3 + \lambda_5) - T_2 \cdot \lambda_1 - T_3 \cdot \lambda_3 - T_4 \cdot \lambda_5 - T_0 \cdot \lambda_0 &= 0; \\
 T_2 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2) - T_1 \cdot \lambda_1 - T_3 \cdot \lambda_2 &= \Delta P_R; \\
 T_3 \cdot (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) - T_2 \cdot \lambda_2 - T_1 \cdot \lambda_3 - T_4 \cdot \lambda_4 &= \Delta P_{Fe}; \\
 T_4 \cdot (\lambda_4 + \lambda_5) - T_3 \cdot \lambda_4 - T_1 \cdot \lambda_5 &= \Delta P_{Cu}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Для определения адекватности полученной модели были проведены экспериментальные исследования. Для испытаний были выбраны 3 электродвигателя с самовентиляцией мощностью 0,55 kW, 5,5 kW, 7,5 kW и один двигатель с независимой вентиляцией мощностью 2,2 kW. Для получения картины теплового поля в узлы двигателя (пазовая и лобовые части обмоток, железо статора, 3 точки корпуса статора) были вмонтированы стандартные датчики температуры. Регистрировалась также температура окружающей среды со стороны забора охлаждающего воздуха и температура ротора с помощью инфракрасного измерителя температуры через небольшое отверстие в крышке подшипника. Испытания проводились на автоматизированных испытательных стендах университета прикладных наук города Эсслинген (Германия).

Результаты определения температур с использованием тепловой модели и их сравнительная оценка с результатами измерений на испытательном стенде для двигателя мощностью 0,55 kW представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Сравнение результатов

	Модель	Измерения	$\Delta \%$
$T_1, ^\circ\text{C}$	51,2	49,5	3,41
$T_2, ^\circ\text{C}$	61,6	67,4	8,66
$T_3, ^\circ\text{C}$	59,5	57,1	4,25
$T_4, ^\circ\text{C}$	64,7	70,1	7,67

На рис. 3 представлены результаты измерения температур при проведении тепловых испытаний двигателей мощностью 0,55 kW и 5,5 kW. Приведенные значения температур соответствуют установившемуся режиму работы электродвигателя при номинальной нагрузке и питании его от сети. Следует отметить, что регистрация

температур, в том числе и температуры вращающегося ротора, производились в режиме реального времени с помощью современных цифровых регистраторов температур.

Анализ результатов показал, что наиболее уязвимыми с точки зрения нагрева узлами электродвигателя являются обмотка статора и ротор. Температуры остальных узлов не превышают 60°C и представляют интерес разве что с теоретической точки зрения. При промышленной эксплуатации электродвигателя на эти температуры не следует обращать внимание и учитывать их для формирования сигналов защиты электроприводов. Температуру ротора в процессе работы двигателя контролировать без применения специальных методов также невозможно. Поэтому в качестве информативного параметра можно использовать только температуру обмотки статора.

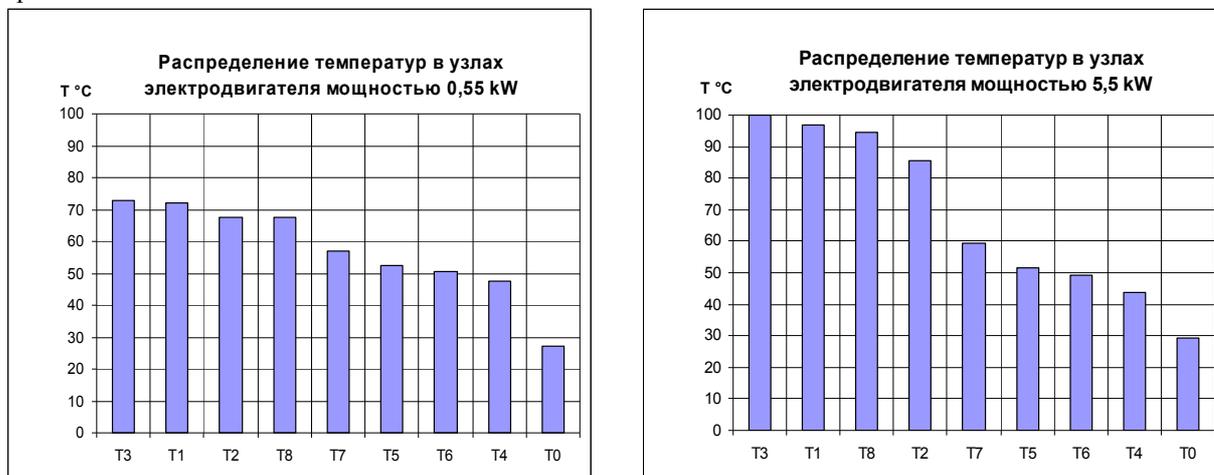


Рис. 3. Результаты тепловых испытаний электродвигателей:

T0 – температура окружающей среды; T1 – температура в лобовой части обмотки статора со стороны вентилятора; T2 – температура обмотки статора в средней части паза; T3 – температура в лобовой части обмотки статора со стороны вала; T4 – температура корпуса со стороны вентилятора; T5 – температура в средней части корпуса; T6 – температура корпуса со стороны вала; T7 – температура стали статора в средней части; T8 – температура ротора

Результаты показывают, что разность температур в лобовых частях обмотки статора имеет место, но она незначительна (до 5°C). Температура обмотки в пазу статора ниже температур в лобовых частях, поэтому с практической точки зрения для контроля теплового состояния статорной обмотки достаточно контролировать температуру в ее лобовой части со стороны вала. На практике иногда устанавливают термозлемент в лобовую часть обмотки со стороны вентилятора. В таких случаях необходимо учитывать эту разницу температур в разных частях обмотки для обеспечения адекватного контроля температуры в обмотке и выработки сигналов защиты электропривода.

В связи с вышеизложенным можно произвести дальнейшее упрощение тепловой модели, представленной на рис.2, путем исключения из схемы, как минимум, неконтролируемого узла T2. В случае, когда потери в стали будут увеличиваться (например, при ухудшении свойств электротехнической стали или при питании электродвигателя от преобразователя частоты), этот фактор может влиять на величину температуры в обмотке статора. Его можно учитывать по изменению разности температур обмотки статора и корпуса двигателя в установившемся режиме работы.

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования позволили оценить картину теплового распределения температур в узлах электрической машины и подтвердить практически сделанные упрощения теоретической тепловой модели электродвигателя. При этом погрешности определения температур согласно упрощенной тепловой модели не превышают, по сравнению с результатами измерений на стенде, 9 %

Полная тепловая модель может быть использована для электродвигателей ответственных механизмов, где необходимо контролировать температуру во многих узлах электрической машины с целью предотвращения аварийных ситуаций вследствие электрических (пробой обмотки) или механических причин (выход из строя подшипников). Кроме этого, данная тепловая схема позволяет оценить тепловое состояние всех основных элементов и узлов электродвигателя в режимах с различной нагрузкой при длительном режиме работы, производить анализ изменения теплового состояния при изменении конструктивных параметров и потерь в электродвигателе. Полученная упрощенная тепловая модель может быть использована в современных системах электропривода и защит электродвигателя общепромышленного исполнения.

Литература:

1. Борисенко А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Проектирование электрических машин. /Под ред. И.П.Копылова – М.: Энергия, 1980.
3. Rolf Fischer. Elektrische Maschinen. 12 Auflage. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2003.