

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Значительная доля отказов по причине повреждения обмоток статора асинхронных двигателей (АД) вызывается эксплуатационными причинами, приводящими к перегреву обмоток [1]. Зависимость скорости термического старения изоляции от ее температуры носит нелинейный характер [2]. Из-за этого при работе в повторно-кратковременном режиме (ПКР) при разных продолжительностях включения и длительностях цикла амплитуда колебаний температуры отличается по величине, что приводит к разной средней скорости расхода ресурса изоляции за цикл. При этом следует отметить, что темп изменения температуры обмотки при изменении нагрузки более чем на порядок превосходит темп изменения средней температуры двигателя, поэтому при работе в ПКР температура обмотки может изменяться в широких пределах. Указанные обстоятельства приводят к необходимости использования таких термодинамических моделей нагрева двигателя для оценки его теплового состояния, которые более адекватно, чем традиционная одномассовая модель, отражают скорость изменения температуры обмотки статора двигателя при интенсивных тепловых переходных процессах.

В условиях реальной инженерной практики при отсутствии детальной информации о конструктивных данных электрической машины расчет параметров сложных многомассовых термодинамических моделей зачастую является нереальным. В то же время, двухмассовая модель нагрева дает приемлемое по точности описание термодинамических процессов в обмотке статора АД [3]. Такая термодинамическая модель содержит два узла с теплоемкостями C_1 (соответствует теплоемкости обмотки статора) и C_2 (соответствует теплоемкости второго узла, отражающего запас тепловой энергии в остальных элементах двигателя), а также три тепловые проводимости: λ_{12} - между узлами 1 и 2, λ_{10} - от первого узла в охлаждающую среду и λ_{20} - от второго узла в охлаждающую среду.

Параметрами, наиболее сложными для определения в рассматриваемой модели являются тепловые проводимости. Существуют подходы к определению тепловых проводимостей для такой модели, основанные на записи ее уравнений в статическом режиме. Однако этот путь можно использовать лишь в случае, когда имеются сведения для расчета мощностей потерь, относящиеся к продолжительному режиму работы. Для двигателей, предназначенных для работы в повторно-кратковременном режиме, зачастую такой информации нет. В этой ситуации представляется логичным использовать для определения тепловых проводимостей соотношения, описывающие изменение температуры в повторно-кратковременном режиме.

ГОСТом 28173-89 «Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и рабочие характеристики» в п. 15.6.2 установлено, что при работе в периодическом режиме (S3-S8) превышение температуры в середине периода, дающего наибольшее превышение температуры, должно быть не более предельных значений, указанных в этом стандарте. Аналогично ГОСТ Р 52776-2007 в п.8.4 устанавливает, что для машин, испытываемых в периодических режимах (S3-S8), за температуру в конце испытания принимают температуру в середине последней части рабочего цикла, имеющего наибольшую температуру. Отсюда следует, что для проверки адекватности теплового режима двигателя при его работе в ПКР имеет смысл сравнивать превышение температуры его обмотки в середине рабочего участка цикла с допустимым превышением температуры для данного класса изоляции (τ_{1N}).

С учетом аperiodического характера термодинамических процессов в электрических машинах, можно получить выражение для превышения температуры обмотки статора на середине интервала t_p в установившемся цикле ($\tau_{1p/2}$):

$$\tau_{1p/2} = \left[g_{1(p)}' \tau_{1min} + g_{1(p)}'' \tau_{2min} + g_{1(p)}''' \right] \exp\left(-\frac{t_p}{2T_{1(p)}}\right) + \left[g_{2(p)}' \tau_{1min} + g_{2(p)}'' \tau_{2min} + g_{2(p)}''' \right] \exp\left(-\frac{t_p}{2T_{2(p)}}\right) + \tau_{1уст(p)}, \quad (1)$$

где τ_{1min} и τ_{2min} - минимальные (начальные) значения перегрева первого и второго узла модели; $g_{1(p)}'$, $g_{1(p)}''$, $g_{1(p)}'''$, $g_{2(p)}'$, $g_{2(p)}''$ и $g_{2(p)}'''$ - постоянные коэффициенты, определяемые из условия равенства начальных значений перегрева в каждом цикле; t_p - длительность рабочего интервала в цикле; $T_{1(p)}$ и $T_{2(p)}$ - постоянные времени двухмассовой термодинамической модели; $\tau_{1уст(p)}$ - установившееся значение перегрева обмотки. Индексом (p) отмечена принадлежность величин к интервалу t_p .

Поскольку определению подлежат три неизвестные тепловые проводимости, требуется три уравнения для их определения, которые можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}\tau_{1p/2}(i) &= \tau_{1N}; \\ \tau_{1p/2}(j) &= \tau_{1N}; \\ \tau_{1p/2}(k) &= \tau_{1N},\end{aligned}\quad (2)$$

где i, j, k - три различные стандартные продолжительности включения, для которых имеются данные двигателя. Здесь величина $\tau_{1p/2}$ в каждом уравнении системы (2) рассчитывается по выражению (1) для своей продолжительности включения.

Для решения системы нелинейных уравнений (2) в настоящее время существуют доступные инструменты, например, для этого можно воспользоваться стандартными средствами пакета *Matlab*. При этом надо иметь в виду, что результат решения системы может в определенной степени зависеть от принятых начальных приближений. Поэтому возможно существование более одного решения и требуется произвести их оценку и отбор.

Отбор решений может быть проведен исходя из выполнения следующих достаточно очевидных соотношений: $\lambda_{10} > 0$, $\lambda_{20} > 0$, $\lambda_{12} > 0$, при этом среднее значение τ_1 за цикл должно быть больше среднего значения τ_2 . Отметим также, что для АД закрытого исполнения справедливо соотношение $\lambda_{10} < \lambda_{20}$.

Для двигателя МТКФ012-6 решение системы (2) дает следующие результаты (один из вариантов решения): $\lambda_{10} = 0,385 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$; $\lambda_{20} = 8,16 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$; $\lambda_{12} = 20,68 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$; $\tau_{1N} = 100^\circ\text{C}$ (изоляция класса нагревостойкости F). После определения параметров термодинамической модели, возможна ее "настройка" за счет корректировки полученных значений тепловых проводимостей с целью обеспечения более точного соответствия условию $\tau_{1p/2} = \tau_{1N}$. На рис. 1 показаны результаты моделирования цикла ПКР при продолжительности включения 40% для двигателя МТКФ012-6. Здесь обозначено: 1 – процессы в пяти-массовой термодинамической модели; 2 – процессы в двухмассовой термодинамической модели. Для построения графиков использовалась двухмассовая модель, скорректированная путем увеличения λ_{10} до $0,635 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$ (добавлено 3% от значения суммарной теплоотдачи в охлаждающую среду $\lambda_{10} + \lambda_{20}$).

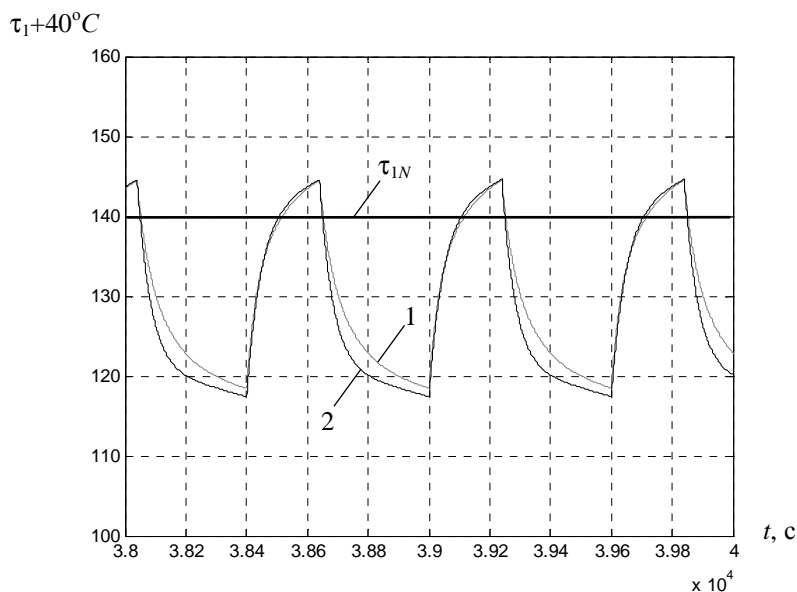


Рис. 1. Результаты моделирования

Как видно из рис. 1, двухмассовая термодинамическая модель может обеспечить сравнительно высокую точность расчета, оставаясь при этом достаточно простой для того, чтобы ее параметры можно было определить при наличии весьма ограниченного объема данных о конструктивных параметрах АД.

Литература

1. Котеленец, Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
2. Ермолин, Н.П. Надежность электрических машин / Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
3. Зюзев, А.М. Термодинамические модели для проверки асинхронного двигателя по нагреванию / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // *Электротехника*. – 2012. – №9. – С. 48–52.