

ПОСТРОЕНИЕ СТЕПЕНИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОвого СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Введение. Прогнозирование теплового состояния обмоток электрических машин в различных режимах работы актуально на этапах проектирования, производства и эксплуатации. Решение задач прогнозирования можно осуществить путем моделирования теплового состояния элементов конструкции машин. Режимы работ электрических машин разнообразны. Их особенности характеризуются с помощью диаграммы нагрузок, в которой выделяют соответствующие временные интервалы. Например, для электродвигателей можно выделить участки с постоянной нагрузкой, пуска, торможения, изменений частоты вращения. В зависимости от режима работы моделирование имеет определенные особенности, связанные с условиями теплоотвода, мощности источников тепла и др. Подобные отличия определяют структуру системы прогнозирования и алгоритм ее работы. Кроме того, моделирование имеет свои отличия при проектировании, производстве и эксплуатации.

Постановка задачи исследования. В работе изложены принципы построения систем проектирования и диагностики теплового состояния обмоток электрических машин, работающих в различных режимах с производственным характером нагрузок, а также особенности их построения на этапах проектирования, создания, производства и эксплуатации.

Материалы исследования. Основным узлом системы прогнозирования и контроля теплового состояния узлов электрических машин является тепловая модель. Она может быть сформирована на базе эквивалентных тепловых схем замещения (ЭТС) [1] либо динамической тепловой модели узлов (ДТМУ) машин [3]. ЭТС представляет собой разветвленную схему, на которой указаны источники тепловыделения и пути движения тепловых потоков. В ЭТС выделены узлы (тела), представляющие собой элементы конструкции машин с их усредненной температурой. Узлы соединяются ветвями, указывающими на направление тепловых потоков. Количество тел может быть велико. Это элементы обмоток (пазовая, лобовая части и их изоляция), зубцы, сердечник магнитопровода, внутренний воздух и т.п. Однако, для систем прогнозирования достаточно (4÷10) тел. [1].

Динамика тепловых процессов описывается системой линейных дифференциальных уравнений. Их количество равно числу (n) тел ЭТС. В матричной форме система уравнений теплового состояния имеет вид:

$$C \cdot \frac{d\theta}{dt} + \lambda \cdot \theta = P,$$

где $\theta = (\theta_1 \dots \theta_k)$ - матрица-столбец превышений температуры тел над окружающей средой; $\frac{d\theta}{dt}$ - матрица-столбец производных температур; $C = [C_1 \dots \tilde{N}_n]$ - матрица-столбец теплоемкостей узлов; $\lambda = [\lambda_{ij}]$ - квадратная матрица ($n \times n$) тепловых проводимостей; $P = [P_1 \dots P_n]$ - матрица-столбец мощностей источников тепла.

Значения элементов матриц уравнения теплового состояния могут изменяться в зависимости от режима работы. Рассмотрим особенности формирования матриц.

Квадратная матрица тепловых проводимостей λ включает два типа элементов. Первый тип – сумма проводимостей ветвей, подсоединенных к i -тому узлу ЭТС, имеет знак плюс. Второй тип λ_{ij} – сумма проводимостей ветвей, соединяющих i -ый и j -ый узлы ЭТС, все элементы этого вида имеют знак минус. Величины теплопроводностей ветвей определяются особенностью движения теплового потока вдоль ветви. При передаче тепловой энергии путем теплопроводности их считают постоянными. В случае, когда теплота отводится с поверхности в окружающую среду (от лобовых частей обмоток поверхности станины и пр.), их величины переменные и определяются условиями теплоотдачи с поверхностями охлаждения. С учетом вышеизложенного получены формулы для расчета тепловых проводимостей различных ветвей [1]. Они зачастую имеют эмпирический характер и величины λ , нуждаются в коррекции по результатам испытаний на нагревание.

Элементы матрицы мощностей источников тепла P определяются потерями в узлах электрических машин и в общем случае равны:

$$P_i = P_{i \text{ пер}} + P_{i \text{ пост}} + P_{i \text{ доб}},$$

где $P_{i \text{ пер}}$ – переменные; $P_{i \text{ пост}}$ – постоянные; $P_{i \text{ доб}}$ – добавочные потери в i -м узле.

Постоянные потери состоят, как правило, из потерь в стали и механических потерь, причем последние включают в схему ЭТС в редких случаях, когда выделяют узел подшипников или т.п.

Переменные потери в обмотках зависят от квадрата кратности тока β_i^2 и находятся в функциональной зависимости от температуры:

$$P_{i \text{ пер}} = \beta_i^2 \beta_{i0 \text{ пер}} (1 + \alpha \theta_i),$$

где α - температурный коэффициент сопротивления;

$P_{i0 \text{ пер}} = P_{i0 \text{ э}} = m I_1^2 r_{i0}$ - электрические потери в обмотках при номинальном токе и сопротивлении r_{i0} , приведенном к температуре окружающей среды.

При учете зависимости сопротивления обмоток от температуры необходимо внести соответствующие изменения в элементы типа λ_{ii} матрицы проводимостей. Их уточненная величина λ'_{ii} равна

$$\lambda'_{ii} = \lambda_{ii} - \beta_i^2 P_{i0 \text{ э}} \alpha.$$

Добавочные потери в зависимости от их природы могут быть постоянными или находиться в функциональной зависимости от тока. Добавочные потери, обусловленные зубцовыми гармониками, принято считать пропорциональными квадрату тока β_i^2 . В асинхронных двигателях их зачастую разделяют поровну между узлами железа статора и ротора, тогда

$$P_{i \text{ доб}} = \beta_i^2 P_{i \text{ добн}}.$$

Величины потерь в элементах конструкций электрических машин могут быть определены с помощью известных формул [2] и по результатам опытов, предусмотренных в программах различных испытаний. Например, при приемо-сдаточных испытаниях, которым подвергаются все выпускаемые машины.

Из вышеизложенного следует, что системы прогнозирования и контроля, построенные на базе тепловых моделей с использованием ЭТС позволяют судить о тепловом состоянии одновременно различных узлов электрических машин. Однако они имеют существенный недостаток, связанный с определенными трудностями и недостаточной точностью при определении тепловых проводимостей. Подобные системы можно рекомендовать при проектировании электрических машин.

Системы, предназначенные для оценки теплового состояния при создании электрических машин, также могут быть построены с тепловыми моделями на базе ЭТС. На этапе приемочных испытаний по результатам испытаний на нагрев можно осуществить коррекцию параметров модели, что дает возможность судить о тепловых перегрузках в различных режимах работы.

В системах прогнозирования и контроля теплового состояния, используемых при эксплуатации электрических машин, рационально использовать модели на базе ДТМУ. Пассивные параметры модели рассчитываются по экспериментально полученным кривым нагрева и охлаждения [3] и могут быть определены на этапе приемочных испытаний. Они едины для всех машин одного типоразмера и могут быть записаны в каталог, подобно параметрам электрической схемы замещения. Их можно использовать в системах прогнозирования на этапе приемо-сдаточных испытаний, что дает возможность судить о тепловом состоянии каждой выпускаемой электрической машины в различных режимах работы.

Выводы. Из вышеизложенного следует, что при создании систем прогнозирования и контроля теплового состояния обмоток электрических машин следует иметь в виду особенности их дальнейшего использования. Структурные схемы систем одинаковы. Принцип их работы основан на моделировании теплового состояния с помощью микропроцессорной техники. В системах должен быть предусмотрен узел для формирования исходных данных для моделирования. С этой целью в память микропроцессора должны быть записаны пассивные параметры модели (тепловые проводимости и теплоемкости) для всех возможных режимов охлаждения машин. Кроме того, необходим алгоритм формирования активных параметров модели (потерь) по известным токам и напряжениям. По заданной диаграмме нагрузок для каждого ее временного интервала формируются активные и пассивные параметры модели. При эксплуатации электрических машин параметры модели формируются через определенные промежутки времени по поступающим в систему прогнозирования и контроля с разных значений токов и напряжений, и процесс моделирования осуществляется непрерывно.

Применение систем прогнозирования и контроля теплового состояния позволит существенно повысить качество создаваемых электрических машин, судить о допустимых тепловых перегрузках выпускаемых машин и повысить их надежность при эксплуатации.

Литература.

1. Г.А.Сипайлов, Д.И.Санников, В.А.Жадан. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М.: ВШ, 1989.-239с.
2. Сыромятников Н.А. Режимы работ асинхронных электродвигателей – М.: Энергоатомиздат, 1984.-240с.
3. Федоров М.М. Динамические тепловые модели узлов электрических машин//Электромашинобудовання та електрообладнання. – Киев, 1999-№53.