

УДК 681.3; 623.313

Моделирование динамики теплового состояния изоляции обмоток при производстве электродвигателей

М.И. Федоров, Д.М. Малеев, И.А. Резников
Донецкий национальный технический университет
maleev404@gmail.com

Федоров М.М., Малеев Д.М., Резников И.А. Моделирование динамики теплового состояния обмоток при производстве электродвигателей. В статье рассмотрены вопросы моделирования динамики теплового состояния изоляции обмоток при производстве электродвигателей. Обосновано применение динамических тепловых моделей узлов и приведен алгоритм получения их параметров. Показана объективная возможность получить характеристики теплового состояния обмоток каждого выпускаемого двигателя.

Выбор мощности электродвигателей и режима работы электропривода в соответствии с диаграммой нагрузок в значительной степени определяется способностью их изоляции обмоток выдерживать тепловые нагрузки.

При производстве электродвигателей суждение о тепловом состоянии их обмоток осуществляется по результатам испытаний на нагревание, которые предусмотрены при проведении приемочных, периодических и типовых испытаний [1,2]. Приемочные испытания проводятся на опытном образце электрической машины. По их результатам можно судить о различных электромеханических характеристиках. Периодические испытания производятся с целью проверки того, насколько производство поддерживает качество выпускаемых машин. Типовые испытания проводятся при изменении конструкции материалов или технологии изготовления. Объем периодических и типовых испытаний достаточно велик и включает в себя проверку соответствующих параметров по программе приемочных испытаний.

Приемо-сдаточным испытаниям подвергается каждый выпускаемый электродвигатель, поэтому объем этих испытаний ограничен и испытания на нагревание в них не предусмотрены. Однако, по результатам можно судить об определенных электромеханических характеристиках. Например, для асинхронных двигателей (АД) можно получить параметры электрической схемы замещения, а, следовательно, и токи в обмотках, потери при различных моментах нагрузки на валу и т.п.

Суждения о тепловом состоянии испытуемых электродвигателей по результатам

испытаний на нагревание ограничены. Это, как правило, температуры обмоток при номинальной нагрузке двигателя, работающего в продолжительном режиме. Для электрических машин, работающих в повторно-кратковременных режимах, регистрируются изменения температур обмоток $\tau(t)$ в одном из возможных циклов квазиустановившегося состояния. Например, для цикла длительностью $t_{\text{ц}} = 10$ мин и продолжительностью включения ПВ=0.4 регистрируются изменения температуры при работе под нагрузкой в течение $t_p = 10$ мин от минимального τ_{min} до максимального τ_{max} значений температуры в цикле. Соответственно, во время паузы $t_n = 6$ мин при отключенном двигателе уменьшение температуры от τ_{max} до τ_{min} .

В предлагаемой работе рассматривается возможность получения характеристик динамики теплового состояния обмоток каждого выпускаемого электродвигателя в произвольном режиме работы. Поставленная задача может быть решена путем использования динамических тепловых моделей электродвигателей, которые формируются на основе эквивалентных схем замещения (ЭТС) электрических машин [3], либо путем использования динамических тепловых моделей (ДТМУ) отдельных узлов электродвигателей [4].

В качестве примера рассмотрим динамическую тепловую модель асинхронного короткозамкнутого двигателя, представленную на рис. 1.

Модель сформирована на основе ЭТС, содержащей шесть узлов (тел), в которых контролируется температура выделенных элементов конструкции двигателя. Таковыми являются: 1 - пазовая часть обмотки статора; 2 -

лобовая часть обмотки статора; 3 - сердечник статора; 4 - ротор; 5 - внутренний воздух и 6 - корпус. Узлы соединены тепловыми проводимостями λ_{ij} , в соответствии с тепловыми

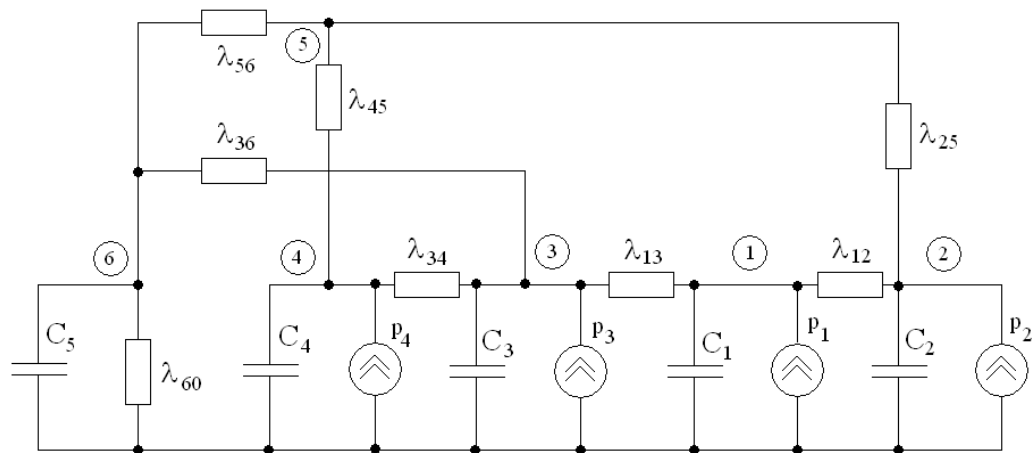


Рисунок 1 - Динамическая тепловая модель асинхронного короткозамкнутого двигателя.

потоками, направленными от источников тепла p_i в окружающую среду. К каждому узлу подключена теплоёмкость C_i , в которой накапливается тепловая энергия соответствующего элемента конструкции двигателя. Теплоёмкость внутреннего воздуха принята равной нулю $C_5=0$.

К соответствующим узлам подключены источники энергии p_i , которыми являются элементами конструкции: p_1 - потери в меди пазовой части обмотки статора, p_2 - потери в меди в лобовой части обмотки статора, p_3 - потери в стали и добавочные потери в сердечнике статора, p_4 - потери в меди обмотки ротора и добавочные потери в сердечнике ротора.

Параметры модели можно разбить на активные (источники тепла p_i) и пассивные (теплоемкости C_i и теплопроводности λ_{ij}). Пассивные параметры определяются массогабаритными характеристиками элементов конструкции, поэтому их можно считать едиными для всех электродвигателей одного типоразмера.

Активные параметры у двигателей одного типоразмера могут изменяться в определенных пределах по различным причинам: некоторое изменение сечения проводов обмоток, качество стали сердечника, изменение добавочных потерь при питании от преобразователей частоты и пр. Кроме того, возможны колебания токов в обмотках при одинаковом моменте сопротивления на валу, например, из-за колебания скольжения у АД. Поэтому при проведении испытаний на нагревание у различных электродвигателей одного типоразмера температура обмоток может

колебаться в пределах 20%. Необходимо отметить, что активные параметры могут быть определены для каждого двигателя на этапе приемо-сдаточных испытаний.

Следует также иметь в виду, что косвенная оценка теплового состояния обмоток по известным активным параметрам не гарантирует эксплуатацию выпускаемых электродвигателей с температурами их обмоток не превышающих допустимую для соответствующего класса изоляции, следовательно, желательно иметь картину динамики теплового состояния выпускаемых электродвигателей в характерных режимах работы.

Из вышеизложенного следует, что для получения характеристик динамики теплового состояния выпускаемых двигателей необходимо иметь пассивные параметры их моделей, получаемых расчетным путем [3]. Проводимости λ_{12} , λ_{13} и λ_{36} определяются с использованием коэффициентов теплопроводностей материалов и геометрических размеров соответствующих элементов конструкции, поэтому их получают с достаточной степенью точности. Величины λ_{25} , λ_{34} , λ_{45} , λ_{56} и λ_{60} зависят от коэффициентов теплоотдачи, а, следовательно, от режима обдува воздухом соответствующих элементов конструкции.

В качестве примера рассмотрим систему уравнений теплового состояния асинхронного короткозамкнутого двигателя. Она имеет вид:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1(\lambda_{12} + \lambda_{13}) - \theta_2\lambda_{12} - \theta_3\lambda_{13} = p_1 \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \theta_2(\lambda_{12} + \lambda_{25}) - \theta_1\lambda_{12} - \theta_5\lambda_{25} = p_2 \\ C_3 \frac{d\theta_3}{dt} + \theta_3(\lambda_{13} + \lambda_{34} + \lambda_{36}) - \theta_1\lambda_{13} - \theta_4\lambda_{34} - \theta_6\lambda_{36} = p_3 \\ C_4 \frac{d\theta_4}{dt} + \theta_4(\lambda_{34} + \lambda_{45}) - \theta_3\lambda_{34} - \theta_5\lambda_{45} = p_4 \\ \theta_5(\lambda_{25} + \lambda_{45} + \lambda_{56}) - \theta_2\lambda_{25} - \theta_4\lambda_{45} - \theta_6\lambda_{56} = 0 \\ C_6 \frac{d\theta_6}{dt} + \theta_6(\lambda_{36} + \lambda_{56} + \lambda_{60}) - \theta_3\lambda_{36} - \theta_5\lambda_{56} = 0 \end{cases}$$

где: $\theta_i = \tau_i - \tau_0$ - превышение температуры τ_i соответствующего элемента конструкции над температурой окружающей среды τ_0 .

В результате имеем систему из шести уравнений с шестью неизвестными θ . Следует иметь в виду, что при расчете температуры в установившемся режиме $C_i \frac{d\theta_i}{dt} = 0$, а в правой

части необходимо брать потери p_i в элементах конструкции испытуемого образца АД.

Для электродвигателей с самовентиляцией в общем случае необходимо иметь зависимости этих проводимостей от частоты вращения двигателя. Результаты их расчета имеют существенный разброс и нуждаются в коррекции, которая производится с использованием результатов испытаний на нагревание, путем сравнения расчетных и измеренных установившихся температур элементов конструкции двигателя, при работе в продолжительном режиме.

При проведении испытаний на нагревание двигатель должен работать в продолжительном режиме и необходимо фиксировать температуры θ_i возможно большего числа элементов конструкции с целью получения их кривых нагрева. Кроме того, следует измерять различные параметры, позволяющие определять потери в элементах конструкции АД с достаточной степенью точности.

В результате получаем величины тепловых проводимостей в режиме нагрева при номинальной частоте вращения.

После проведения коррекции теплопроводностей следует рассчитать кривые нагрева $\theta_i(t)$ элементов конструкции. Сравнение расчетных и экспериментальных кривых нагрева позволит произвести коррекцию теплоемкостей C_i .

Тепловые проводимости при неподвижном роторе также получают расчетным путем [1] по тем же формулам, что и при работающем двигателе. Однако, коэффициент теплоотдачи не зависит от частоты вращения, а, следовательно, имеем достаточно точные значения λ . Возможные неточности определения проводимостей в режиме охлаждения определяются степенью точности

применяемых расчетных формул. Они также нуждаются в коррекции на основе сравнения с экспериментальными данными. С этой целью в программу испытаний на нагревание необходимо предусмотреть снятие кривых охлаждения. Сравнение расчетных кривых охлаждения с экспериментальными позволяют корректировать величины тепловых проводимостей при неподвижном роторе.

При необходимости получение функциональной зависимости соответствующих тепловых проводимостей от частоты вращения необходимо предусмотреть испытания на нагревание при различных частотах вращения.

Полученные пассивные параметры моделей представляют собой своеобразный тепловой паспорт электродвигателей одного типоразмера, который позволяет судить о динамике теплового состояния каждого выпускаемого электродвигателя в произвольном режиме работы.

Тепловой паспорт можно получить путем использования динамических тепловых моделей (ДТМУ) отдельных узлов электродвигателя. Такими могут быть обмотки (или их части) двигателей, испытывающих наибольшие тепловые нагрузки. Например, лобовая часть обмотки статора АД. На рис. 2 приведена схема ДТМУ:

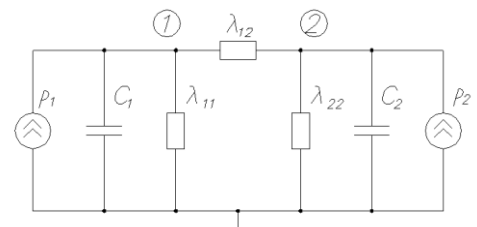


Рисунок 2 - Схема динамической тепловой модели (ДТМУ) узла электродвигателя.

Она содержит три тепловые проводимости (λ_{11} , λ_{12} и λ_{22}), две теплоемкости (C_1 и C_2) и два источника тепла (p_1 и p_2).

Тепловые процессы, моделируемые с помощью ДТМУ можно трактовать следующим образом. В узле 1 моделируется изменение температуры в выбранном узле двигателя, а температура второго узла отражает влияние остальных элементов конструкции на тепловые процессы в выбранном для контроля узле электродвигателя. Соответственно, p_1 равна мощности потерь в выбранном узле, а p_2 - потеря мощности в остальных элементах конструкции. Таким образом, суммарная мощность потерь электродвигателя $\sum p_i$ и мощность источников тепла ($p_1 + p_2$) ДТМУ совпадают.

Динамика тепловых процессов в выбранном узле описывается системой двух

дифференциальных уравнений. Она имеет вид:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1(\lambda_{11} + \lambda_{12}) - \theta_2\lambda_{12} = p_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \theta_2(\lambda_{22} + \lambda_{12}) - \theta_1\lambda_{12} = p_2. \end{cases}$$

В качестве примера рассмотрим выражение для определения p_1 и p_2 при моделировании тепловых процессов в лобовой части обмотки статора.

$$p_1 = p_{m1} + p_c + 0.5 p_\delta$$

где: $p_{m1} = 3I_1^2 r_1 = k_{i1}^2 p_{nr1}$ – потери в меди обмотки статора, здесь $k_{i1} = I_1 / I_{1n}$ – коэффициент кратности тока I_1 обмотки статора по отношению к номинальному току I_{1n}

p_c – потери в стали,

$$p_\delta = k_i^2 p_{\delta n} - \text{добавочные потери.}$$

Добавочные потери p_δ принято считать пропорциональными k_i^2 и их распределяют поровну между статором и ротором.

$$p_2 = p_{m2} + 0.5 p_\delta$$

где: $p_{m2} = 3 I_2^2 r_1 = k_i^2 p_{m2}$ – потери меди в обмотке ротора.

Пассивные параметры ДТМУ (λ_{11} , λ_{22} , λ_{12} , C_1 и C_2) едины для всех двигателей одного типоразмера. Тепловые проводимости зависят от режима обдува воздухом элементов конструкции. При частоте вращения близкой к номинальной они обозначаются λ_{n11} , λ_{n22} и λ_{n12} . Неподвижному ротору соответствуют λ_{ox11} , λ_{ox22} и λ_{ox12} . В случае наличия режимов с переменной частотой вращения ω необходимо иметь соответствующие функциональные зависимости $\lambda_{11}(\omega)$, $\lambda_{22}(\omega)$ и $\lambda_{12}(\omega)$.

Пассивные параметры ДТМУ определяют с использованием кривых нагрева и охлаждения, полученным по результатам испытаний на нагревание. Важным преимуществом ДТМУ

является то, что нет необходимости использования эмпирических формул с учетом различных геометрических размеров элементов конструкции. С помощью полученных параметров ДТМУ можно рассчитать зависимости $\theta(t)$ для любого режима работы. Это дает возможность дополнительной коррекции пассивных параметров ДТМУ на основе сравнения расчетной и экспериментальной зависимости $\theta(t)$ в одном из возможных повторно-кратковременных режимов работы опытного образца электродвигателя.

Из вышеизложенного следует, что имеется объективная возможность получения характеристик теплового состояния обмоток каждого выпускаемого двигателя. Для этого электродвигатели одного типоразмера должны иметь тепловой паспорт, параметры которого определяются по результатам испытаний на нагревание. Для этого программа их проведения должна быть скорректирована соответствующим образом.

Литература

1. Котеленец И.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
2. Справочник по электрическим машинам. Под. общ. ред. И.П. Копылова. – М., Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
3. Счастливый Г.Г. Нагревание закрытых асинхронных двигателей. – Киев, «Наукова думка», 1966.
4. Федоров М.М. Динамические тепловые модели узлов электрических машин. – Міжвідомчий науково-технічний збірник «Електро-машинобудування та електро-обладнання», № 53, Київ, 1999, с. 70-73.

Статья поступила в редакцию 12.2.2017
Рекомендована к публикации д-ром тех. наук В.Н. Павлышом