

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ.

Федоров М.М.

Кафедра ТОЭ ДонГТУ

E-mail: michael@fedorov.dc.donetsk.ua

### Abstract

*Fedorov M. M. Simulation of a thermal condition in nodes of electrical machines in a various operational. In the article the methods of application of dynamic thermal models of nodes electrical machines are considered for a researching of thermal processes in a various operational modes.*

### Введение

Процессы тепловыделения, возникающие в электрических машинах в ходе взаимного преобразования электрической энергии в механическую, неизбежны и приводят к ограничениям при эксплуатации. Наряду с максимальными механическими и электрическими напряжениями в электрических машинах имеет место предельно допустимые температуры активных частей. Наиболее уязвимыми к тепловым перегрузкам являются изоляционные материалы обмоток электрических машин.

В настоящее время суждение о тепловых нагрузках обмоток в электрических машинах осуществляется по результатам испытаний на нагревание, которые, согласно ГОСТ 183-74 проводятся на опытном образце машины во время приемочных и периодических испытаний, а также при типовых испытаниях в случае изменения конструкции, параметров или технологии. В программе приемо-сдаточных испытаний, которым подвергается каждая выпускаемая электрическая машина, испытаний на нагревание не предусмотрено. Это объясняется значительной длительностью типовых испытаний.

Необходимо также отметить, что возможности суждения о тепловых нагрузках образцов электрических машин по результатам испытаний, предусмотренных ГОСТ, ограничены. Как правило, это температура обмоток (или других частей машины) в продолжительном режиме (S1 согласно ГОСТ 183-74). Предусматриваются испытания и в кратковременном режиме S2 (при длительностях 30 или 60 мин.). Испытания проводятся при номинальном токе для соответствующего режима; при этом фиксируется максимальная температура  $\theta_{\max}$ , которая не должна превышать допустимую. Для электрических машин, предназначенных для работы в повторно-кратковременных режимах, испытания проводятся в режиме S3 (обычно при длительности цикла  $t_{\text{ц}} = 10$  мин. и продолжительности включения 40%, либо 15% и 25%). Испытания продолжаются до квазиустановившегося состояния, когда изменение температуры  $\theta(t)$  в цикле периодически повторяются в последующих циклах. Фиксируются максимальная  $\theta_{\max}$  и минимальная  $\theta_{\min}$  температуры цикла. Стандартом, по специальному требованию заказчика, предусмотрены типовые испытания в более сложных режимах работы, однако это потребует наличия специальных испытательных стендов.

В этой связи моделирование тепловых процессов в узлах электрических машин позволит существенно снизить затраты и значительно расширить возможности суждения о тепловых нагрузках в узлах электрической машины в различных режимах работы.

### 1. Выбор тепловой модели и расчет ее параметров.

Важнейшую роль в решении задачи моделирования тепловых процессов в узлах электрической машины играет выбор модели. Одной из перспективных является динамическая тепловая модель узлов (ДТМУ) электрической машины, разработанная в Донецком государственном техническом университете [1], схема которой представлена на рис. 1.

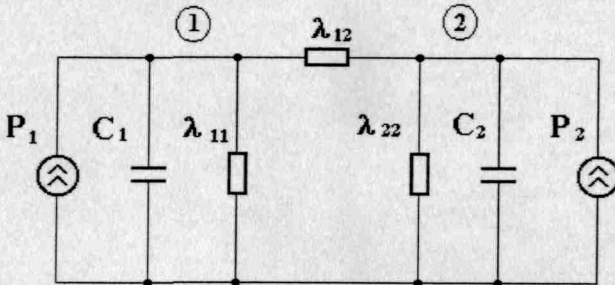


Рисунок 1. - Схема динамической тепловой модели узлов.

Схема включает два источника тепла  $P_1$  и  $P_2$ , теплопроводности  $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{12}$  и  $\lambda_{22}$  а также теплоемкости  $C_1$  и  $C_2$ . В узле 1 модели формируется температура  $\theta_i(t)$  любого  $i$ -го узла электрической машины, а узел 2 отражает суммарную реакцию остальных элементов конструкции машины на динамику тепловых процессов в рассматриваемом узле. Тогда величина  $P_1$  соответствует потерям мощности в выбранном узле, а  $C_1$  – его теплоемкость. Если  $P_2$  – потери мощности в остальной части машины, то величину теплоемкости  $C_2$  необходимо подбирать таким образом, чтобы тепловая энергия, запасенная в  $C_2$  в установившемся режиме, равнялась запасенной тепловой энергии в остальных элементах конструкции электрической машины.

Пассивные параметры модели – теплопроводности ( $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_{22}$ ) и теплоемкости ( $C_1$  и  $C_2$ ) едины для всех электрических машин одного типоразмера. Их величины изменяются в зависимости от режима охлаждения. Например, в асинхронных двигателях с самовентиляцией в режиме S3 имеет место два состояния: нагрев при вращающемся роторе и охлаждение при неподвижном роторе. В режиме S8, предусматривающем изменение частоты вращения АД, пассивные параметры изменяются в функции частоты вращения.

Подбор параметров модели должен обеспечить адекватное воспроизведение тепловых переходных процессов при различных режимах работы, поэтому методика расчета пассивных параметров модели для выбранного узла электрической машины базируется на использовании их кривых нагрева и охлаждения, которые могут быть получены экспериментальным путем.

Рассмотрим основные соотношения для получения расчетных формул при определении пассивных параметров модели. Для произвольного  $i$ -го узла электрической машины кривую нагрева  $\theta_i(t)$  с высокой точностью можно аппроксимировать аналитическим выражением с двумя экспоненциальными составляющими [2], которое имеет вид:

$$\theta(t) = \theta_{уст} (1 - \alpha_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - \alpha_2 e^{-\frac{t}{T_2}}); \quad (1)$$

где:  $\theta_{уст}$  – установившаяся величина превышения температуры узла электрической машины над температурой окружающей среды,

$T_1$  и  $T_2$  – соответственно большая и малая постоянные времени экспонент,

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты удельного веса экспонент.

Кривая нагрева представляет собой своеобразную весовую функцию и отражает особенности динамических тепловых процессов в выбранном узле. Экспонента с большой постоянной времени  $T_1$  характеризует общую длительность теплового переходного процесса  $t_{п.п.}$ , а экспонента с малой постоянной времени характеризует скорость изменения температуры ( $d\theta/dt$ ) на начальных этапах теплового переходного процесса. При  $t = 0$  скорость изменения температуры равна:

$$\frac{d\theta(0)}{dt} = \theta_{уст} \left( \frac{\alpha_1}{T_1} + \frac{\alpha_2}{T_2} \right) = \theta_{уст} \cdot b \quad (2)$$

где:  $b$  – коэффициент, характеризующий скорость изменения температуры при  $t = 0$ .

Система дифференциальных уравнений, описывающих динамику тепловых процессов с помощью ДТМУ (рис.1), имеет вид:

$$\begin{aligned} C_1(d\theta_1/dt) + \theta_1(\lambda_{11} + \lambda_{12}) - \theta_2 \lambda_{12} &= P_1, \\ C_2(d\theta_2/dt) + \theta_1(\lambda_{22} + \lambda_{12}) - \theta_1 \lambda_{12} &= P_2. \end{aligned} \quad (3)$$

При  $t = 0$  и нулевых начальных условиях  $\theta_1(0) = 0$  из (2) и (3) следует:

$$C_1 = \frac{P_1}{\theta_{уст} \cdot b} \quad (4)$$

Для определения остальных пассивных параметров модели запишем систему (3) в нормальном виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1(\alpha_{11} + \alpha_{12}) - \theta_2 \alpha_{12} &= \frac{P_1}{C_1} = \theta_{уст} \cdot b \\ \frac{d\theta_2}{dt} + \theta_2(\alpha_{22} + \alpha_{12}) - \theta_1 \alpha_{12} &= \frac{P_2}{C_2} = P^* m \theta_{уст} \cdot b, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{где: } \alpha_{11} = \lambda_{11}/C_1; \quad \alpha_{22} = \lambda_{22}/C_2; \quad \alpha_{12} = \lambda_{12}/C_1; \quad m = C_2/C_1; \quad P^* = P_2/P_1 \quad (6)$$

В установившемся режиме имеет место:  $d\theta_1/dt = 0$ ,  $d\theta_2/dt = 0$ , а  $\theta_1 = \theta_{уст}$ ,  $\theta_2 = \theta_{2уст}$ , тогда из (5) следует:

$$\begin{aligned} \alpha_{11} + \alpha_{12} - \theta^* \alpha_{12} &= b, \\ (\alpha_{22} + \alpha_{12}) \theta^* - \alpha_{12} &= P^* b \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $\theta^* = \theta_{2уст}/\theta_{уст}$  – относительный коэффициент изменения температуры в установившемся режиме. Его величина находится в пределах  $\theta^* = (0.9 - 1.1)$ , ориентировочно можно принять  $\theta^* = 1$ .

Характеристическое уравнение системы дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{vmatrix} \gamma + (\alpha_{11} + \alpha_{12}) & -\alpha_{12} \\ -\alpha_{12}m & \gamma + m(\alpha_{22} + \alpha_{12}) \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

Или в виде полинома второй степени

$$\gamma^2 + \gamma((\alpha_{11} + \alpha_{12}) + m(\alpha_{22} + \alpha_{12})) + m((\alpha_{11} + \alpha_{12})(\alpha_{22} + \alpha_{12}) - \alpha_{12}^2) = 0 \quad (9)$$

Для обеспечения адекватного воспроизведения тепловых переходных процессов в ДТМУ необходимо, чтобы корни характеристического уравнения  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  были соответственно равны:

$$\gamma_1 = -\frac{1}{T_1}, \quad \gamma_2 = -\frac{1}{T_2} \quad (10)$$

Тогда, согласно теореме Виета, имеем:

$$\begin{aligned} (\alpha_{11} + \alpha_{12}) + m(\alpha_{22} + \alpha_{12}) &= 1/T_1 + 1/T_2 \\ m((\alpha_{11} + \alpha_{12})(\alpha_{22} + \alpha_{12}) - \alpha_{12}^2) &= 1/(T_1 + T_2) \end{aligned} \quad (11)$$

Рассматривая совместно уравнения (7) и (11), получаем единую систему из четырех уравнений с четырьмя неизвестными  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{22}$ ,  $\alpha_{12}$  и  $m$ , решение которой позволяет определить пассивные параметры ДТМУ выбранного узла при заданном режиме охлаждения электрической машины.

Кривые нагрева (охлаждения), полученные при неизменных условиях охлаждения и постоянные в относительных единицах ( $\theta(t)$ )  $\theta_{уст}$ , практически совпадают у всех электрических машин одного типоразмера, следовательно и пассивные параметры ДТМУ ( $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_{22}$ ,  $C_1$  и  $C_2$ ) едины для всех электрических машин одного типоразмера. Последнее означает, что они могут быть получены на этапе приемочных испытаний и записаны в каталог в виде своеобразного "теплового паспорта". ДТМУ составляется для узла (узлов) электрических машин, подвергающимся наибольшему тепловым перегрузкам. Например, у короткозамкнутого асинхронного двигателя (АД) таким является лобовая часть обмотки статора. У АД с фазным ротором в некоторых случаях наибольшие тепловые нагрузки имеют место в обмотке ротора. Электрические машины с изменяющимися условиями теплоотвода должны быть снабжены тепловыми паспортами для наиболее характерных режимов охлаждения. Например, АД с самовентиляцией, работающий в повторно-кратковременном режиме S3 или кратковременном режиме S2, имеет обдув элементов конструкции при вращающемся роторе и отсутствие его в период пауз при неподвижном роторе. При пусках и торможениях (режимы S4, S5 и S7) можно использовать осредненные значения пассивных параметров. В режиме S8, предусматривающем регулирование частоты вращения АД, необходимо иметь пассивные параметры ДТМУ при различных частотах вращения.

## 2. Моделирование теплового состояния электрических машин.

Предложенная выше ДТМУ может быть использована при исследовании тепловых процессов в узлах электрических машин при различных режимах работы. На рис. 2 приведена структурная схема модели. При ее построении были использованы система дифференциальных уравнений в нормальном виде (5) и пакет прикладных программ MatLab 4.2 с приложением Simulink.

На вход модели подается сигнал  $\theta_{уст}$ , который характеризует внешние силы, т.е. величину нагрузки. Величина  $\theta_{уст}$  может быть определена с помощью уравнений (3)

или (5) при условии  $d\theta_1/dt = 0$  и  $d\theta_2/dt = 0$ , а также потерь  $P_1$  и  $P_2$ , рассчитанных для заданной нагрузки по известным методикам [3]. На выход модели имеем сигнал изменения температуры  $\theta(t)$  в рассматриваемом узле электрической машины.

Рассмотрим особенности моделирования в различных режимах работы.

В продолжительном режиме S1 на вход модели подается постоянный сигнал  $\theta_{уст}$ , соответствующий нагрузке. На выходе получим кривую нагрева  $\theta(t)$  выбранного узла при заданном значении нагрузки.

При переменной периодически повторяющейся нагрузке (режим S6) и неизменных условиях охлаждения необходимо выделить в течение цикла  $t_{ii}$  интервалы времени  $t_i$  с постоянной нагрузкой. Каждому интервалу  $t_i$  соответствует свое значение  $\theta_{уст i}$ , т.е. изменение входного сигнала. При изменении режимов охлаждения на интервалах цикла в процессе моделирования, наряду с изменением величин  $\theta_{уст}$  на интервалах предусматривают и изменение пассивных параметров ( $\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{22}, C_1, C_2$ ).

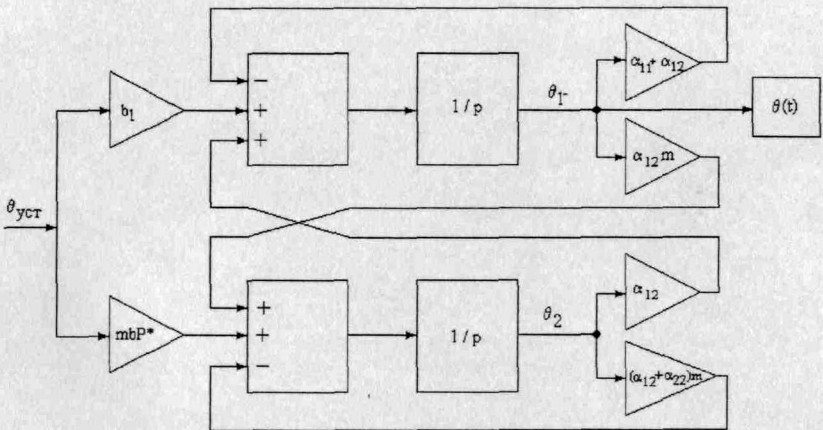


Рисунок 2. – Структурная схема тепловой модели.

Из вышеизложенного следует, что при моделировании необходимо предусмотреть файл, управляющий входными сигналами и параметрами модели в соответствии с режимом работы.

В качестве примера в табл. 1 приведены характеристики, необходимые для формирования входного сигнала в течение цикла при моделировании теплового состояния АД, работающего в режиме с частыми пусками и электрическим торможением S5.

Кроме данных, приведенных в табл. 1, необходимо указывать число периодов. При моделировании в конце каждого интервала должны запоминаться значения  $\theta_1$  и  $\theta_2$  и процесс моделирования в последующих циклах должен начинаться с ненулевых начальных условий.

Таблица 1.–Характеристики входного сигнала цикла тепловой модели АД в режиме S5.

Название интервала	Пуск	Работа	Торможение	Пауза
Длительность интервала	$t_{nc}$	$t_p$	$t_T$	$t_{пз}$
$\theta_{уст}$	$\theta_{уст\ nc}$	$\theta_{уст}$	$\theta_{уст\ T}$	0
Параметры модели	$\alpha_{11\ nc}, \alpha_{12\ nc}, \alpha_{22\ nc}$	$\alpha_{11\ p}, \alpha_{22\ p}, \alpha_{12\ p}$	$\alpha_{11\ T}, \alpha_{22\ T}, \alpha_{12\ T}$	$\alpha_{11\ m}, \alpha_{22\ m}, \alpha_{12\ m}$

Подобным образом можно сформировать входной сигнал модели для любого характера нагрузки электрической машины и, следовательно, осуществить моделирование динамики тепловых процессов. При необходимости можно аналогично моделировать тепловое состояние и в других узлах машины, при этом параметры модели различных узлов могут существенно отличаться.

Принимая во внимание то, что пассивные параметры ДТМУ едины для всех электрических машин одного типоразмера, моделирование теплового состояния в различных режимах можно осуществлять для всех выпускаемых машин на этапе приемо-сдаточных испытаний, т.к. по их результатам можно определить потери в узлах каждой машины и, следовательно, сформировать выходной сигнал тепловой модели в любом режиме работы.

### Заключение

Предлагаемая методика моделирования теплового состояния на базе ДТМУ, разработанной в ДонГТУ, позволяет судить о динамике тепловых процессов в узлах электрических машин при различных режимах работы. Необходимо также отметить, что аналогов в отечественной и зарубежной практике автором не обнаружено.

### Литература:

1. Федоров М.М. и др. Микропроцессорные системы защиты двигателя от тепловых перегрузок. Труды Дон ГТУ. Электротехника и энергетика, вып 2, Донецк 1998. - С.166-171.
2. Федоров М.М. и др. Прогнозирование динамики тепловых процессов в узлах электрических машин по экспериментальным кривым нагрева и охлаждения // Взрывозащищенное оборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ.- Донецк 1998.- С.42-50.
3. Сыромятников Н.А., Режимы работы асинхронных электродвигателей, М., Энергоиздат, 1987.-С 346.