

# ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Фёдоров М.М., Денник В.Ф., Анухтин М.В., Малеев Д.М.  
 Донецкий Национальный Технический Университет  
 fedorov@skif.net

*A Possibility of definition characteristics thermal transient processes in electrical machines are shown by changing a cool of conditions based on the using a lines of hot on and cool of an elements of construction. An concrete application is adduced.*

Повторно-кратковременные режимы работы электрических машин характеризуются непрерывным изменением температуры элементов их конструкции, поэтому при оценке и прогнозировании их теплового состояния необходимо использовать характеристики динамики тепловых процессов. В теории переходных процессов для этих целей используются переходные характеристики [1], позволяющие рассчитывать динамику процессов при различном характере возмущающих воздействий (например, с помощью интеграла Дюамеля). В качестве переходных характеристик при оценке динамики теплового состояния можно использовать кривые нагрева и охлаждения элементов конструкции электрических машин. Они могут быть получены экспериментально или путем решения системы дифференциальных уравнений теплового состояния, которая в матричной форме имеет вид

$$C \frac{\partial \theta}{\partial t} + \lambda \theta = P, \quad (1)$$

где:  $\theta$  – вектор средних температур перегрева элементов конструкции электрической машины;

$C$  – вектор теплоёмкостей;

$\lambda$  – матрица теплопроводностей;

$P$  – вектор потерь.

В общем случае решение этой системы получают в виде суммы принужденных  $\theta_{пр}$  и свободных  $\theta_{св}$  составляющих. Для получения характеристик динамики теплового переходного процесса интерес представляет свободная составляющая, выражение которой для  $i$ -го элемента конструкции имеет вид

$$\theta_{св_i} = \sum_{j=1}^{j=n} \theta_{уст_j} a_{ij} \exp\left(-\frac{t}{T_j}\right), \quad (2)$$

где:  $n$  – число элементов конструкции машины, в которых рассчитываются средние значения температур;

$a_{ij}$  – коэффициенты удельного веса экспонент;

$T_j$  – постоянные времени экспонент.

Значения  $\theta_{св_i}(0)$  для кривых нагрева равно взятым с обратным знаком установившимся температурам, т.е.  $\theta_{уст_i} = -\theta_{пр_i}$ , а для кривых охлаждения – начальной температуре  $\theta_i(0)$ , причем обычно  $\theta_i(0) = \theta_{уст_i}$ .

Постоянные времени  $T_j$  и в значительной мере коэффициенты удельного веса экспонент зависят от величин элементов матриц  $\lambda$  и  $C$ . Это означает, что формы кривых тепловых переходных процессов определяются массо-габаритными показателями машин и условиями отвода тепла в них. Для асинхронных двигателей (АД) с самовентиляцией изменение частоты вращения означает изменение величин теплопроводностей матрицы  $\lambda$ . В повторно-кратковременных режимах они могут изменяться на каждом интервале цикла. В режиме S3 имеет место два интервала: работа под нагрузкой при практически неизменной частоте вращения и пауза при неподвижном роторе. В повторно-кратковременном режиме с частыми пусками S4 и электрическими торможениями S5 на интервалах пуска и торможения имеет место изменение частоты вращения от нуля до номинальной. В этом случае необходимо иметь функциональную зависимость теплопроводностей от частоты вращения  $\lambda_{ij}(\omega)$ , либо её среднее значение  $\lambda_{ij\text{ ср}}$ . В режиме S8 в течение цикла предусматривается несколько интервалов работы с различными частотами вращения. Из вышеизложенного следует, что для оценки и прогнозирования теплового состояния асинхронного двигателя с самовентиляцией, работающего в повторно-кратковременных режимах важную роль играет учёт условий теплоотвода при различных частотах вращения.

Ниже приведены результаты исследования влияния частоты вращения АД на форму кривых охлаждения и основных характеристик динамики тепловых процессов. Исходным материалом служили кривые охлаждения, полученные экспериментальным путём. С этой целью АД, работающие с номинальной нагрузкой в продолжительном режиме S1 доводились до установившегося состояния и температуры элементов его конструкции соответствовали номинальному режиму  $\theta_{уст i} = \theta_{уст н i}$ . Далее АД отключался от сети и происходил процесс охлаждения, начиная с температуры  $\theta_{ox}(0)_i = \theta_{уст i}$ , при этом частота вращения ротора поддерживалась постоянной с помощью вспомогательного двигателя. В процессе охлаждения фиксировалась температура лобовой части обмотки статора, как узла АД, испытывающего наибольшие тепловые нагрузки. Подобный подход позволяет сконцентрированно оценить влияние частоты вращения двигателя на форму кривых охлаждения и исключить влияние других внешних и внутренних факторов. На рис.1 приведены полученные указанным образом кривые охлаждения двигателя МТН111-6 при различных частотах его вращения  $\omega$ .

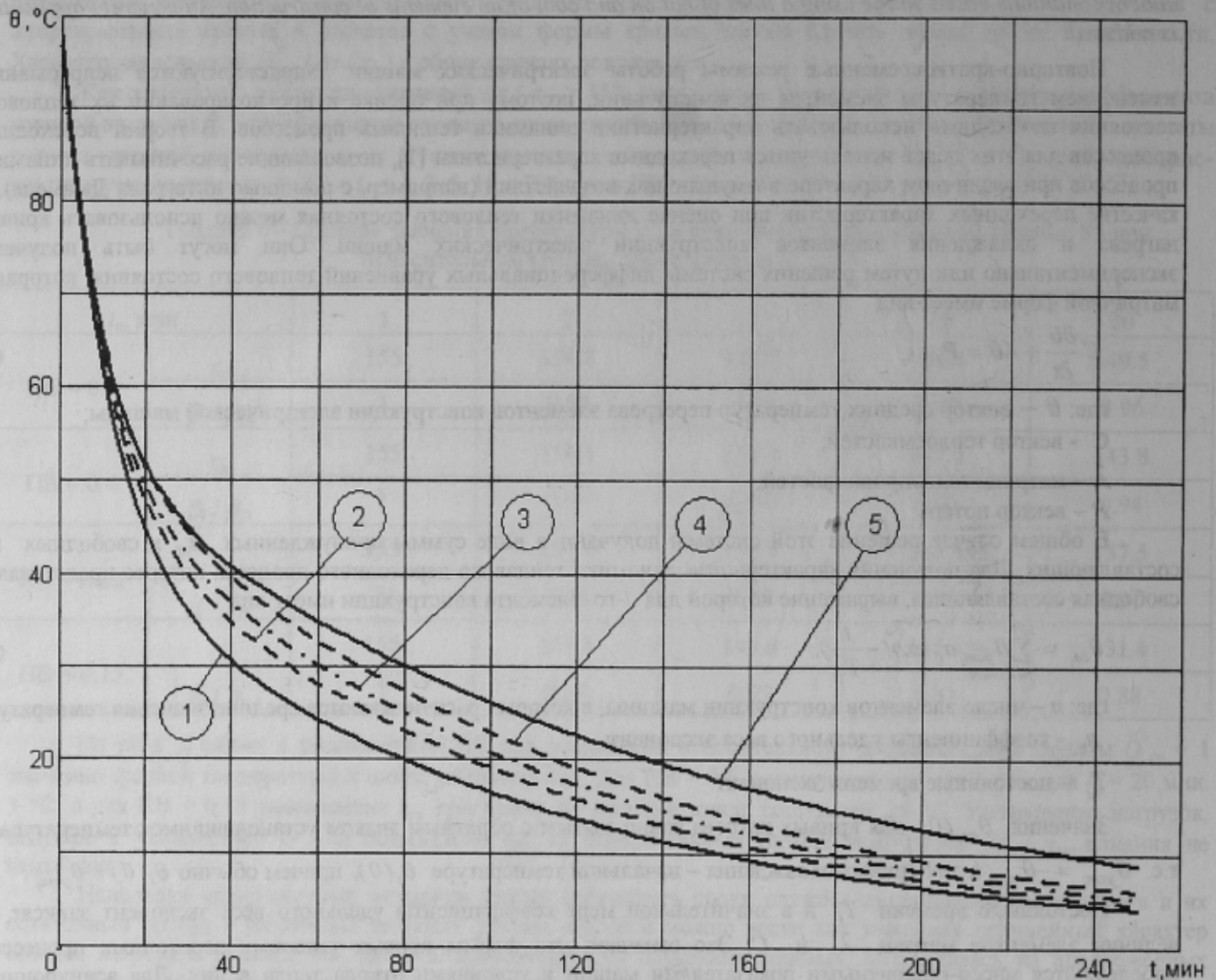


Рисунок 1 - Кривые охлаждения двигателя МТН111-6 при: 1 – номинальной частоте вращения ( $\omega_n$ ); 2 – 0.75 номинальной; 3 – 0.5 номинальной; 4 – 0.25 номинальной; 5 – неподвижном роторе

Для оценки формы кривых охлаждения и получения характеристик динамики теплового состояния двигателя исходные кривые  $\theta_{ox}(t)$  аппроксимировались аналитическим выражением в виде суммы двух экспоненциальных составляющих с большой  $T_1$  и малой  $T_2$  постоянными времени.

$$\theta_{ox}(t) = \theta_{ox}(0) \left( a_1 \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + a_2 \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right) \quad (3)$$

Экспоненциальная составляющая с большой постоянной времени  $T_1$  позволяет оценить общую длительность переходного процесса  $t_{nn}$ . Если задаться величиной изменения температуры двигателя в течение одного часа  $\Delta\theta$ , то время переходного процесса на основании (3) будет

$$t_{nn} = T_1 \ln \frac{a_1 \theta_{ox}(0)}{\Delta\theta} \quad (4)$$

Экспоненциальная составляющая с малой постоянной времени  $T_2$  позволяет учесть другую важную характеристику динамики тепловых процессов – скорость изменения температуры на различных этапах переходного процесса.

$$\frac{d\theta_{ox}}{dt} = -\theta_{ox}(0) \left( \frac{a_1}{T_1} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{a_2}{T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right) \quad (5)$$

Для повторно-кратковременных режимов важную роль играет начальный этап переходного процесса при  $t=0$

$$\left( \frac{d\theta_{ox}}{dt} \right)_{t=0} = -\theta_{ox}(0) \left( \frac{a_1}{T_1} + \frac{a_2}{T_2} \right) \quad (6)$$

Авторами предложена методика определения коэффициентов удельного веса экспонент  $a_1$  и  $a_2$ , а также постоянных времени  $T_1$  и  $T_2$  кривым, полученным экспериментальным или расчетным (например, численными методами) путём [2].

В табл.1 приведены результаты определения по этой методике коэффициентов удельного веса экспонент  $a_1$  и  $a_2$ , постоянных времени  $T_1$  и  $T_2$  кривых охлаждения, представленных на рис.1. Там же указано время переходного процесса при  $\Delta\theta=0.05\theta(0)$  и относительная скорость изменения температуры  $\theta'(0)$  (в качестве базовой величины взята  $\theta(0)$ ) при  $t=0$ .

Таблица 1

$\omega$	$\theta(0)$ , град	$a_1$	$a_2$	$T_1$ , мин	$T_2$ , мин	$t_{nn}$ , мин	$\theta'(0)$ , мин <sup>-1</sup>
0	98	0.547	0.453	139	9.4	460	-0.052
$0.25\omega_n$	98	0.57	0.43	112	9.2	375	-0.052
$0.5\omega_n$	98	0.506	0.494	105	10.3	339	-0.049
$0.75\omega_n$	98	0.532	0.468	107	10.5	358	-0.047
$\omega_n$	98	0.429	0.571	109	11.6	328	-0.053

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1. При изменении условий охлаждения существенно изменяется время переходного процесса. Так при номинальной частоте вращения оно уменьшается 1.4 раза по сравнению со временем охлаждения двигателя при неподвижном роторе.

2. Скорость же изменения температуры в начале процесса оказалась практически неизменной и независимой от изменения условий охлаждения. Этому факту может быть дано следующее объяснение: в начале процесса охлаждения происходит выравнивание градиентов температур и тепловые потоки в основном замыкаются по стержням обмотки и железу сердечника, а влияние скорости внутреннего воздуха является незначительным. Оно сказывается на последующих стадиях процесса.

3. Предложенная методика позволяет не только качественно оценивать показатели тепловых переходных процессов при изменении условий охлаждения электрических машин, но и рассчитывать их количественно с достаточной степенью точности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. Учебник для вузов. – М., Энергоатомиздат, 1989.- 580 с.
2. Федоров М.М, Денник В.Ф., Алексеев Е.Р., Карась С.В. Прогнозирование динамики тепловых процессов в сборочных единицах электрических машин по экспериментальным кривым нагрева и охлаждения. "Взрывозащищенное электрооборудование" // Сборник научных трудов УкрВНИИВЭ.-Донецк.- 1998.- С. 42-50