ТЕПЛОВЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В УЗЛАХ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТАХ НАГРУЗКИ.

Федоров М.М.

Динамика теплового состояния электрических машин определяется с одной стороны,. условиями эксплуатации, характеризующимися: состоянием окружающей среды, разнообразием режимов работы и изменениями условий теплообмена, с другой – ее конструктивными особенностями, свойствами материалов, используемых для изготовления отдельных частей машины, системой охлаждения и др. Эффективные методы расчета тепловых переходных процессов основаны на использовании эквивалентных тепловых схем замещения, позволяющие применять для этих целей хорошо разработанные методы расчета переходных процессов в электрических цепях. Наиболее приемлемым является метод переменных состояния. В качестве переменных состояния выбираются температуры отдельных узлов (тел) асинхронного двигателя. Такими, как правило, являются: температуры пазовых и лобовых частей обмоток, активного железа, станины, корпуса и др. Динамика тепловых процессов в узлах электрической машины при постоянных (усредненных) во времени потерях и теплоотдаче описывается системой линейных дифференциальных уравнений (уравнение состояния), которая в матричной форме имеет вид

$$C\frac{d\theta}{dt} + \lambda\theta = P. \tag{1}$$

где $\theta=(\theta_1,...,\theta_n)$ – вектор-столбец превышения температур узлов электрической машины над температурой окружающей среды; $\frac{d\theta}{dt}=(\frac{d\theta_1}{dt},...,\frac{d\theta_n}{dt})$ – вектор-столбец производных температуры; C – диагональная матрица теплоемкостей; $\lambda = (\lambda_{ij})$ – квадратная матрица тепловых проводимостей; P – вектор-столбец потерь в узлах электрической машины; n – число тел эквивалентной тепловой схемы замещения.

Для асинхронных двигателей вектор потерь P необходимо представить в виде суммы векторов постоянных $P_{пост}$, переменных $P_{пер}$ и добавочных $P_{доб}$ потерь. Переменные потери в обмотках асинхронного двигателя находятся в функциональной зависимости от квадрата тока и температуры обмоток, поэтому выражение вектора переменных потерь имеет вид:

$$P_{пер} = K_I^2 P_{пер.н}(E + \alpha\theta), \tag{2}$$

где $K_I = I / I_н$ – вектор – столбец коэффициентов учитывающих степень отличия тока I обмоток при нагрузке от тока $I_н$ при номинальной нагрузке; $P_{пер.н}$ – диагональная матрица потерь при номинальной нагрузке и сопротивлении обмоток при окружающей температуре; $(E + \alpha\theta)$ – диагональная матрица учитывающая изменение переменных потерь вследствие зависимости сопротивления обмоток от температуры; α – температурный коэффициент сопротивления; E – единичная матрица.

Добавочные потери, пропорциональные квадрату тока, равны

$$P_{доб} = K_I^2 P_{доб\,н}. \qquad (3)$$

Принимая во внимание (1), (2), (3) уравнение состояния динамики тепловых процессов в узлах асинхронного двигателя в нормальном виде будет

$$\frac{d\theta}{dt} + D\theta = F, \qquad (4)$$

где $D = (D_{ij})$ – квадратная матрица коэффициентов равная

$$D = C^{-1}(\lambda + K_I^2 \alpha P_{пер.н}), \qquad (5)$$

$F = (F_1,...,F_n)$ – вектор – столбец, равный

$$F = C^{-1}(P_{пост} + K_I^2 P_{перн} + K_I^2 P_{доб}). \qquad (6)$$

Для решения системы уравнений состояния (4) на ЭВМ можно использовать численные методы расчета, позволяющие получить кривые тепловых переходных процессов в каждом выделенном i-узле асинхронного двигателя (АД) $\theta_i(t)$. Однако для глубокого и качественного анализа предпочтительно иметь аналитические выражения $\theta_i(t)$. Ниже прилагается методика решения уравнений состояния. С этой целью вектор температуры перегрева θ представляется известным приемом в виде суммы векторов принужденной $\theta_{пр}$ и свободной $\theta_{св}$ составляющих

$$\theta = \theta_{пр} + \theta_{св}. \qquad (7)$$

1. Принужденные составляющие $\theta_{пр}$ представляют собой установившиеся температуры узлов асинхронного двигателя при определенной постоянной нагрузке, поэтому имеет место условие $\frac{d\theta}{dt} = 0$. Тогда из системы уравнений (4) следует, что вектор – столбец принужденных составляющих равен

$$\theta_{пр} = D^{-1} F. \qquad (8)$$

Свободные составляющие, определяемые путем решения системы линейных дифференциальных уравнений, в общем случае имеют вид

$$\theta_{св} = A\ (\ \exp(\gamma t)\ ) = A\ (\ \exp(-t/T)\ ), \tag{9}$$

где $A=(A_{ij})$ – квадратная матрица постоянных интегрирования; $\gamma = (\ \gamma_1,...,\gamma_n)$ – вектор – столбец свободных чисел; $T=(T_1,...,T_n)$ – вектор – столбец постоянных времени экспонент ($T_i=1/|\gamma_i|$).

Собственные числа γ определяются как корни характеристического полинома, получаемого из, так называемого, векового определителя [2]

$$|\ \gamma E + D\ | = 0. \tag{10}$$

Переход от векового определителя к характеристическому полиному осуществляется известными методами академика Крылова, Фадеева [2] реализуется на ЭВМ с последующим определением корней полинома γ и постоянных времени экспонент.

Постоянные интегрирования определяются из начальных условий. В отличии от ранее известных работ [2], в которых постоянные интегрирования определяются отдельно для каждой переменной, в данной работе предлагается методика определения матрицы постоянных интегрирования А

$$A = B^{-1} N, \tag{11}$$

где B^{-1} – обратная матрица Вандермонда [2]; $N = (\ N_{ij}\ )$ – квадратная матрица начальных условий.

Матрица Вандермонда формируется из собственных чисел γ.

Первая строка матрицы начальных условий N представляет собой значения свободных составляющих $\theta_{св}(0)$, вторая строка – величины их первых производных $\frac{d\theta(0)}{dt}$, третья – вторых производных $\frac{d^2\theta(0)}{dt^2}$ и т.д. Для определения начального значения производных необходимо воспользоваться матрицей D и вектором – столбцом начальных значений свободной составляющей $\theta_{св}(0)$. Элементы N_i i – строки матрицы N определяются с помощью выражения

$$N_i = (-1)^{i-1} D\,\theta_{св}(0); \tag{12}$$

$$\theta_{св}(0) = \theta(0) - \theta_{пр}(0). \tag{13}$$

Вектор – столбец θ (0) начального температурного состояния узлов асинхронного двигателя задается в исходных данных.

На основе предложенной выше методики была составлена программа и осуществлены расчеты динамики теплового состояния крановых асинхронных двигателей серии МТН. За основу принята семительная эквивалентная тепловая схема замещения, параметры которой рассчитаны по известной методике [1]. В качестве тел выбраны следующие узлы асинхронного двигателя: 1 и 2 – соответственно пазовые части обмоток статора и ротора; 3 и 4 – сердечники статора и ротора; 5 и 6 – лобовые части обмоток статора и ротора; 7 – корпус. На рис. 1 приведены установившиеся температуры $\theta_{уст} = \theta_{пр}$ различных узлов кранового асинхронного двигателя МТН3126 при различных коэффициентах нагрузки $К_{нг}$=М/$М_н$. Из рис. 1 следует, что $\theta_{уст}(К_{нг})$ имеет квадратичный характер и наиболее напряженным узлом, с точки зрения тепловых нагрузок, является лобовая часть обмотки статора.

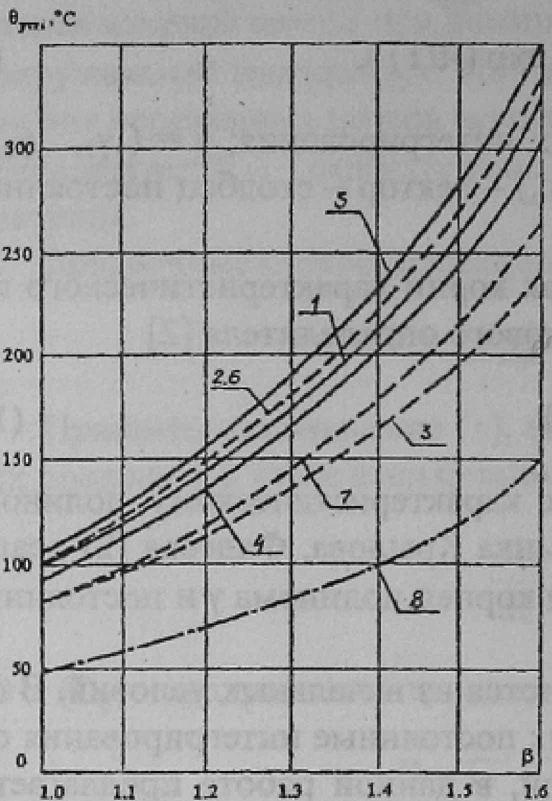

Рисунок 1 – Зависимость $\theta_{уст}$ от нагрузки

Выражение кривых нагрева $\theta_{н.i}(t)$ и охлаждения $\theta_{ох.i}(t)$ для i-го узла асинхронного двигателя получено в виде

$$\theta_{н\,i} = \theta_{уст}\Big(1 + \sum_{j=1}^{7} a_{н\,ij}\big(\exp(-\frac{t}{T_{н\,j}})\big)\Big); \qquad (14)$$

$$\theta_{охi} = \theta_{уст}\Big(\sum_{j=1}^{7} a_{охij}\big(\exp(-\frac{t}{T_{охj}})\big)\Big), \qquad (15)$$

где $T_{нj}$ и $T_{охj}$ – постоянные времени j-экспоненты при нагреве и охлаждении; $a_{нij}$ и $a_{охij}$ – коэффициенты удельного веса экспонент.

Из выражений (14) и (15) следует, что тепловые переходные процессы имеют монотонный апериодический характер. Количественные характеристики определяются постоянными времени и коэффициентами удельного веса экспонент. В табл. 1 приведены постоянные времени $T_{нj}$ и $T_{охj}$ всех семи экспонент кривых нагрева и охлаждения.

Таблица 1 – Постоянные времени экспоненты

Номер экспоненты	1	2	3	4	5	6	7
Tнj, мин	0,28	0,32	1	1,2	3	53,7	12,4
Tохj, мин	0,29	0,32	1,3	1,4	4,1	38,8	174,3

Постоянные времени экспонент можно условно разбить на две групп: малые и большие. Действие экспонент с малыми постоянными времени не продолжительно и они влияют в основном на скорость изменения температуры на начальных этапах переходного процесса. Длительность переходного процесса определяется экспонентами с большими постоянными времени.

В табл. 2 приведены коэффициенты удельного веса экспонент кривых нагрева $\theta_{нi}$ всех выделенных узлов асинхронного двигателя МТН312-6.

Таблица 2 – Коэффициенты удельного веса экспонент

$a_{ij} \backslash T_{нj}$	$T_{н1}$	$T_{н2}$	$T_{н3}$	$T_{н4}$	$T_{н5}$	$T_{н6}$	$T_{н7}$
$a1_j$	0	-0,011	0,006	-0,11	0,005	-0,69	-0,2
a_{2j}	-0,002	-0,001	0	-0,045	-0,025	-1,1	0,173
a_{3j}	0	0	-0,01	0,034	-0,051	-0,857	-0,116
a_{4j}	0	0	-0,008	0,02	-0,021	-1,28	0,247
a_{5j}	0	0,006	-0,013	-0,133	-0,028	-0,75	-0,082
a_{6j}	0,003	0	0,03	-0,124	0,04	-0,959	0,01
a_{7j}	0	0	-0,004	0,009	0,072	-0,927	-0,15

Длительность переходного процесса $t_{пп}$ определяется экспонентой с большой постоянной времени (шестая $T_{н6}$=53,7 мин). Её удельный вес для всех тел высок, так что практическая длительность переходного процесса составляет $t_{пп}=3T_{н6}\approx160$мин. Остальные экспоненты оказывают большее влияние на форму кривых нагрева. На рис. 2 приведены кривые нагрева узлов двигателя МТН312-6 в

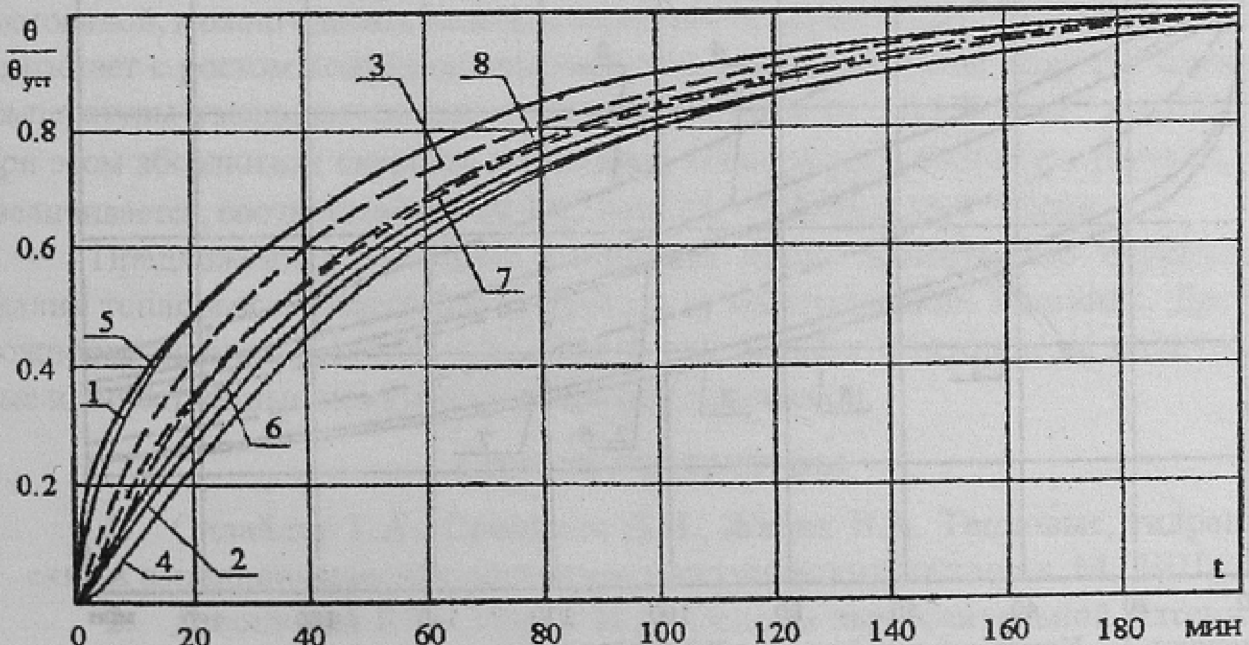

Рисунок 2 – Кривые нагрева АД МТН312-6 в относительных единицах относительных единицах, из которых следует, что форма кривых существенно различается. Основное отличие наблюдается в скорости нарастания температуры на начальных этапах переходного процесса, которая при t=0 определяется выражением

$$\frac{d\theta_i(0)}{dt} = \sum(-\frac{a_{ij}}{T_{\text{н}j}})\theta_{\text{уст}i}\,. \qquad (16)$$

В табл. 3 показаны скорость нарастания изменения температуры узлов АД МТН312-6 в абсолютных и относительных ($\Sigma(-a_{ij} / T_{\text{н}j})$) единицах.

Таблица 3 – Относительные и абсолютные скорости нарастания температуры

Номер узла	1	2	3	4	5	6	7
$\sum(-\frac{a_{ij}}{T_{\text{н}j}})$	0,147	0,0063	0,024	0,002	0,135	0,066	-0,009
$\frac{d\theta(0)}{dt}$, °С/мин	14,4	6	1,9	0,2	14,1	6,4	-0,4

Из табл.3 следует, что наибольшая начальная скорость нарастания температуры – в пазовой и лобовой частях обмотки статора.

Существенное различие форм кривых переходного процесса имеет место при охлаждении. На рис. 3 приведены кривые охлаждения различных узлов кранового АД типа МТН312-6. На начальных этапах теплового переходного процесса идет процесс выравнивания температурного поля АД. Более нагретые

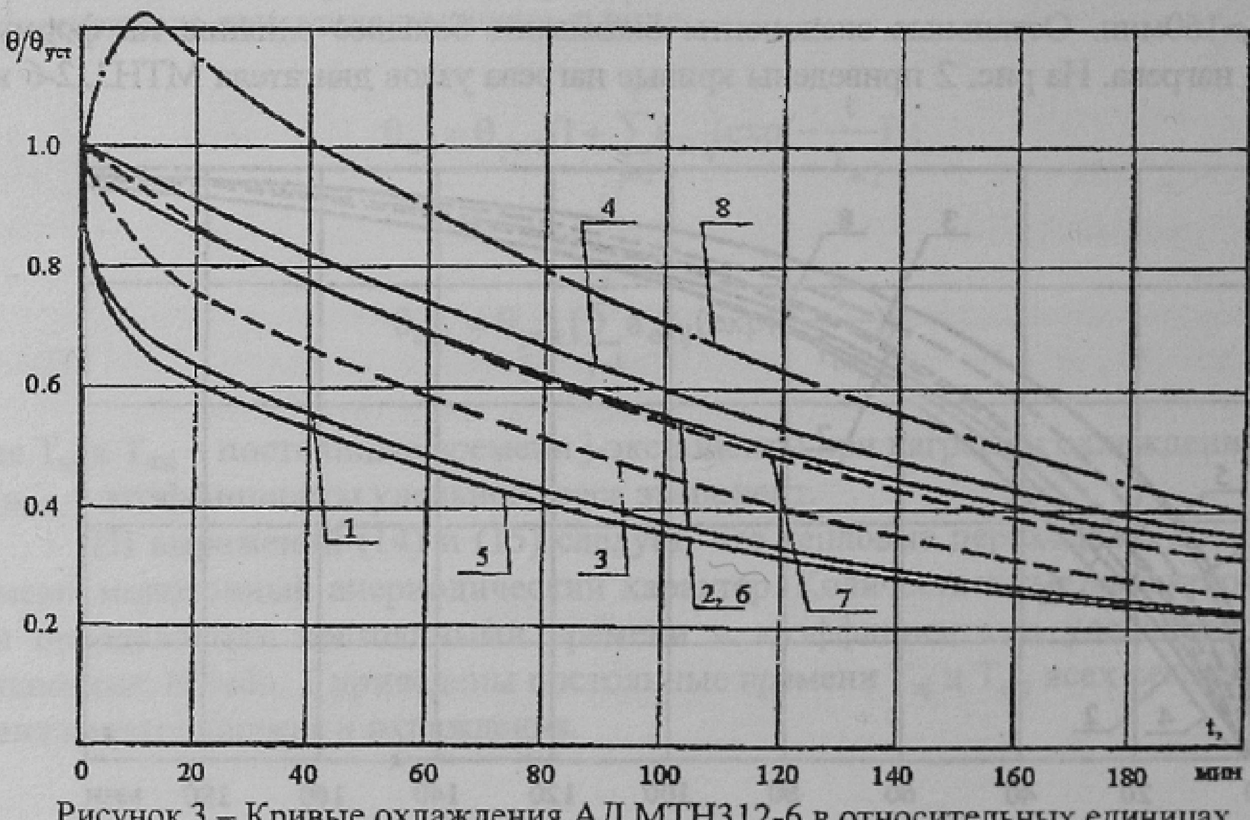

Рисунок 3 – Кривые охлаждения АД МТН312-6 в относительных единицах части двигателя (пазовая и лобовая части обмотки статора) интенсивно охлаждаются. В первые 20 минут их температура уменьшается до 0,6 $\theta_{уст}$. В других узлах темп уменьшения температуры ниже, а температура корпуса вначале возрастает. В дальнейшем устанавливается постоянный перепад температуры и скорость охлаждения выравнивается.

На форму кривых нагрева существенную роль оказывает и уровень токовых нагрузок обмотки. Вследствие функциональной зависимости от температуры сопротивления обмоток, а, следовательно, и переменных потерь, изменяются величины коэффициентов матрицы D, что соответственно приводит к изменениям постоянных времени экспонент и коэффициентов их удельных весов. В табл. 4 приведены постоянные времени экспонент и коэффициенты удельного веса экспонент кривой нагрева пазовой части обмотки статора при различных коэффициентах нагрузки.

Таблица 4 – Коэффициенты удельного веса экспонент выражений θ (t) лобовой части обмотки статора при различных коэффициентах нагрузки

$K_{нг}$	j	1	2	3	4	5	6	7
1,2	$T_{нj}$ мин	0,28	0,32	1,03	1,25	3	65	13
	a_{1j}	0	-0,009	-0,015	-0,072	-0,048	\`-0,8	-0,056
1,4	$T_{нj}$ мин	0,28	0,33	1,05	1,29	3	76,6	13,3
	a_{1j}	0	-0,008	-0,016	-0,06	-0,052	-0,84	-0,024
1,6	$T_{нj}$ мин	0,28	0,33	1,07	1,32	3	97,7	13,8
	a_{1j}	0	-0,007	0	-0,073	-0,01	-0,824	-0,086

Из результатов расчета, приведенных в табл. 4 следует, что в сравнении с номинальным режимом ($K_{нг}$=1) с увеличением нагрузки малые постоянные времени практически неизменны, а большая постоянная времени растет. Принимая во внимание одновременные рост коэффициента удельного веса экспоненты с большой постоянной, можно сделать вывод, длительность переходного процесса при нагреве возрастает с ростом коэффициента нагрузки, а относительная скорость нарастания температуры уменьшается, соответственно 0,136 мин$^{-1}$, 0,115 мин$^{-1}$ и 0,094 мин$^{-1}$. При этом абсолютная скорость нарастания температуры, благодаря росту $\theta_{уст}$ ($K_{нг}$), увеличивается, соответственно 20,3°С/мин, 27,3 °С/мин и 36,4 °С/мин.

Предложенная методика позволяет более качественно осуществлять анализ тепловых переходных процессов в электрических машинах. Дает возможность оценить влияние внешних и внутренних факторов на количественные и качественные показатели тепловых процессов.

Список литературы

1. Силайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. М.: ВШ., 1989 .
2. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: "Наука", 1979 .