

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

**Фёдоров М.М., Денник В.Ф., Малеев Д.М., Горелов М.В.**

**Донецкий государственный технический университет**

*In operation the features of dynamics of thermal processes of an induction motor (IM) in a condition S2 surveyed and is rotined, that the magnification of lapse rates of temperatures with increase of a demand factor reduces in more intensive cooling of windings on the initial stages of transient processes. In further there is a process of smoothing of intensity of lowering of temperature in configuration items a IM. The aggregate transient period diminishes with increase of a demand factor.*

Работа асинхронных двигателей (АД) в кратковременном режиме работы S2 сопряжена с рядом особенностей, имеющих немаловажное практическое значение, однако недостаточно исследованных и практически не освещенных в литературе. В данной работе предполагается в некоторой степени устранить этот пробел.

Согласно ГОСТ 183-74 кратковременный режим S2 означает работу электрической машины с неизменной нагрузкой длительностью 10, 30, 60 или 90 минут (если в стандартах или технических условиях не установлена иная). В каталогах, как правило указываются номинальные мощности при длительностях работы 30 и 60 мин. Далее следует продолжительная пауза, за которую температура активных частей машины должна снизиться практически до первоначального уровня.

В этом режиме в пределах активной зоны АД температура постоянно изменяется во времени. Имеет место два переходных процесса: нагрев (под нагрузкой) и охлаждение (при неподвижном роторе).

В процессе нагрева, также как и в продолжительном режиме, величины напряжений и токов в обмотках неизменны и интенсивность источников тепловой энергии постоянна. Количество теплоты  $W$ , выделяемой в активных частях электрической машины, равно сумме аккумулируемой тепловой энергии в элементах конструкции и отводимой в окружающую среду. При этом максимальная температура  $\theta_{\max}$ ; в обмотках не должна превышать максимально допустимую для соответствующего класса изоляции. Из этого следует, что при меньшей длительности включения нагрузка электрической машины может быть выше, а тепловой переходный процесс будет протекать более интенсивно и имеют место более высокие градиенты температуры. В каталогах машин, работающих в кратковременных режимах работы, указывают номинальные параметры для соответствующей длительности включения, при которых температура обмоток не превысит допустимую в наиболее нагретой части изоляции обмоток.

Количество аккумулированной в частях электрической машины тепловой энергии, определяемой их температурами  $\theta_i$  и теплоемкостями  $C_i$ , будет меняться в зависимости от интенсивности тепловых процессов при нагреве. Если предположить, что независимо от длительности включения, максимальная температура  $\theta_{i\max}$  одинакова, то это означает равенство запасенной тепловой энергии в наиболее нагретой части обмоток ( $W_i = (\theta_{i\max}^2 \cdot C_i) / 2$ ). Однако, вследствие различия перепада температур между отдельными частями машины в зависимости от интенсивности тепловых процессов, в остальных частях электрической машины количество аккумулированной тепловой энергии будет меньше при большей интенсивности тепловых переходных процессов.

При остывании, тепловая энергия, запасенная в частях электрической машины, отводится в окружающую среду. Интенсивность процесса охлаждения, при прочих равных условиях, будет большей при более высоких градиентах температуры. Другими словами более интенсивному процессу нагрева соответствует и более интенсивный процесс охлаждения. Количественный учет этих факторов предлагается авторами настоящей работы.

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 (ЭТС) замещения, позволяющих применять для этих целей хорошо разработанные методы расчета переходных процессов в электрических цепях. Из последних наиболее приемлемым является метод переменных состояния. В качестве переменных состояния выбираются температуры отдельных элементов конструкции (тел) асинхронного двигателя. Такими, как правило, являются: температуры пазовых и лобовых частей обмоток, активного железа, станины, корпуса и др. Динамика тепловых процессов в элементах конструкции АД при

постоянных во времени потерях и условиях теплоотвода описывается системой линейных дифференциальных уравнений (уравнение состояния), которая в матричной форме имеет вид:

$$C \frac{d\theta}{dt} + \lambda \theta = P \quad (1)$$

где:  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$  - вектор-столбец превышения температур элементов конструкции АД над температурой окружающей среды;

$$\frac{d\theta}{dt} = \left( \frac{d\theta_1}{dt}, \dots, \frac{d\theta_n}{dt} \right) - \text{вектор - столбец производных температуры;}$$

$C$  - диагональная матрица теплоемкостей;

$\lambda = (\lambda_{ij})$  - квадратная матрица тепловых проводимостей;

$P$  - вектор - столбец потерь в элементах конструкции электрической машины;

$n$  - число тел эквивалентной тепловой схемы замещения.

Для решения системы уравнений состояния (1) 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 предпочтительнее иметь аналитические выражения  $\theta_i(t)$  в виде суммы векторов принужденной  $\theta_{пр}$  и свободной  $\theta_{св}$  составляющих [1].

Ниже в качестве примера приведены результаты расчета динамики теплового состояния кранового асинхронного двигателя МТН 312-6. За основу принята семительная ЭТС, параметры которой рассчитаны по известной методике [2]. В качестве тел выбраны следующие узлы АД: 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. Выбор ЭТС, содержащей семь тел, обусловлен наиболее рациональным соотношением между приемлемой трудоёмкостью вычислений (и анализа их результатов), а также достаточно высокой степенью адекватности с фактической динамикой теплового состояния двигателя.

Выражение кривых нагрева  $\theta_{нi}(t)$  и охлаждения  $\theta_{охi}(t)$ , полученного путем решения системы уравнений (1), для  $i$ -го узла АД имеет вид

$$\theta_{нi} = \theta_{нi} \left( 1 + \sum_{j=1}^7 a_{нij} (\exp(-t/T_{нj})) \right), \quad (2)$$

$$\theta_{охi} = \theta_{охi} \left( \sum_{j=1}^7 a_{охij} (\exp(-t/T_{охj})) \right), \quad (3)$$

где:  $T_{нj}$  и  $T_{охj}$  - постоянные времени  $j$ -экспоненты при нагреве и охлаждении;

$a_{нij}$  и  $a_{охij}$  - коэффициенты удельного веса экспонент.

Проведены исследования теплового состояния АД МТН 312-6 при его работе в различных кратковременных режимах S2. Ниже приводятся некоторые результаты этого исследования.

На рис.1 приведены расчетные кривые нагрева и охлаждения всех учтенных элементов конструкции двигателя МТН 312-6 при коэффициенте нагрузки  $\beta=1.2$  и его работе в режиме S2, когда перегрев его лобовой части статорной обмотки составляет  $120^\circ\text{C}$ .

Исходя из того, что температура перегрева ни в каком элементе конструкции АД не должна превышать допустимую для изоляции обмоток двигателя (для крановых АД с изоляцией класса F –  $120^\circ\text{C}$ ), определено допустимое время работы  $t_p$  двигателя при различных значениях коэффициента нагрузки  $\beta$ . Величины постоянных времени экспонент и их коэффициенты удельного веса для кривых нагрева (2) и охлаждения (3) в кратковременном режиме работы S2 при различных коэффициентах нагрузки приведены в табл.1. В табл.1 приведено также время работы для соответствующего коэффициента нагрузки, при котором температура лобовой части обмотки статора достигает  $120^\circ\text{C}$ .

Из табл.1 следует, что постоянные времени экспонент кривых нагрева и охлаждения неизменны при всех коэффициентах нагрузки. Изменение формы кривых переходных процессов определяется величинами коэффициентов удельного веса экспонент. В кривых нагрева их изменение обусловлены изменением соотношения постоянных и переменных потерь. Следует отметить, что решающую роль в увеличении скорости нарастания температуры играет возрастание принужденной составляющей с ростом коэффициента нагрузки  $\beta$ . Повышенным темпам нарастания температуры соответствует увеличение градиентов температур и уменьшение времени  $t_p$  достижения допустимой температуры лобовой части обмотки статора. Изменение удельного веса экспонент кривых охлаждения обусловлено изменением начальных температур  $\theta(0)$  различных элементов конструкции асинхронного двигателя. С увеличением коэффициента нагрузки возрастает разница начальных температур между отдельными узлами АД вследствие повышенных градиентов температур.



Таблица 1 – Постоянные времени и коэффициенты экспонент АД МТН-312-6 при работе в режиме S2

	Нагрев							
	$\beta=1.2$ $t_p=125$ мин	Постоянные времени, мин	0.28	0.314	0.983	1.16	2.95	12.1
Коэффициенты экспонент		-0.0004	0.0113	-0.0252	-0.1974	-0.016	-0.103	-0.669
Охлаждение								
Постоянные времени, мин		0.29	0.324	1.325	1.41	4.11	38.8	174.3
Коэффициенты экспонент	0.0006	-0.0241	0.0267	0.14	0.165	0.0573	0.635	
$\beta=1.4$ $t_p=46.9$ мин	Нагрев							
	Постоянные времени, мин	0.28	0.314	0.983	1.16	2.95	12.1	46.7
	Коэффициенты экспонент	-0.0004	0.0122	-0.0274	-0.21	-0.015	-0.095	-0.664
	Охлаждение							
Постоянные времени, мин	0.29	0.324	1.325	1.41	4.11	38.8	174.3	
Коэффициенты экспонент	0.0006	-0.0318	0.0273	0.2156	0.167	0.078	0.5436	
$\beta=1.6$ $t_p=25.8$ мин	Нагрев							
	Постоянные времени, мин	0.28	0.314	0.983	1.16	2.95	12.1	46.7
	Коэффициенты экспонент	-0.0005	0.0128	-0.0291	-0.2185	-0.0146	-0.0892	-0.661
	Охлаждение							
Постоянные времени, мин	0.29	0.324	1.325	1.41	4.11	38.8	174.3	
Коэффициенты экспонент	0.0006	-0.04	0.031	0.302	0.1674	0.0893	0.45	
$\beta=2$ $t_p=8.6$ мин	Нагрев							
	Постоянные времени, мин	0.28	0.314	0.983	1.16	2.95	12.1	46.7
	Коэффициенты экспонент	-0.0005	0.0135	-0.0312	-0.232	-0.0139	-0.0814	-0.6565
	Охлаждение							
Постоянные времени, мин	0.29	0.324	1.325	1.41	4.11	38.8	174.3	
Коэффициенты экспонент	0.0007	-0.0591	0.0523	0.5126	0.1602	0.0722	0.2611	

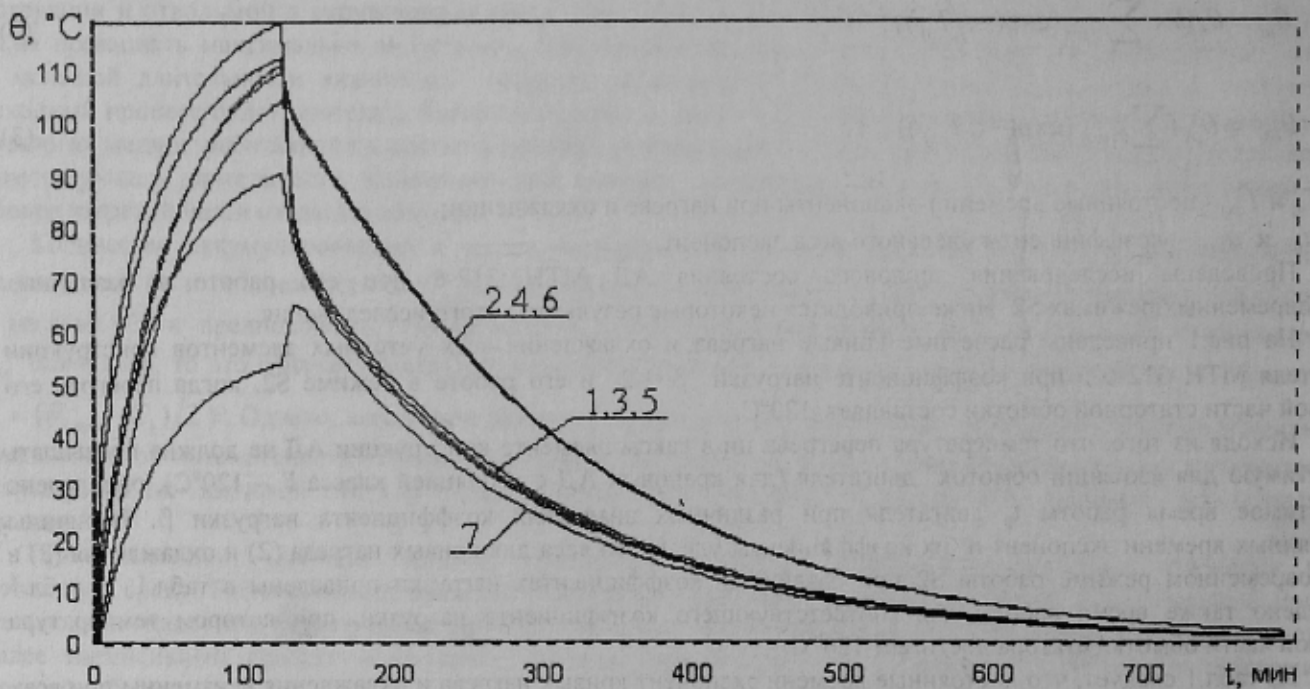


Рисунок 1 – Кривые нагрева и охлаждения двигателя МТН-312-6 при  $\beta=1.2$

В табл.2 приведены начальные значения температур узлов АД в режиме охлаждения, которые дают возможность оценить градиенты температур при различных коэффициентах нагрузки и соответствующие им изменения коэффициента удельного веса экспонент. Как следует из данных табл.2 увеличение градиентов температур приводит к увеличению коэффициентов удельного веса экспонент с малыми постоянными времени и к уменьшению удельного веса экспонент с большими постоянными времени у наиболее нагретых тел.

Таблица 2 – Начальные значения температур в узлах АД при различных коэффициентах нагрузки

$\beta$	Начальные температуры узлов АД, °С						
	$\theta_1(0)$	$\theta_2(0)$	$\theta_3(0)$	$\theta_4(0)$	$\theta_5(0)$	$\theta_6(0)$	$\theta_7(0)$
1.2	113	111.8	90.9	104.7	120	110.3	54.3
1.4	111.7	96.5	83.1	84.7	120	98.4	47.5
1.6	109.5	82.2	73.2	65.5	120	86.8	39.4
2	101	59.5	45.8	32.3	120	69	18.9

Из рис.1 и табл.1 и 2 следует, что в режиме охлаждения более нагретые части АД на начальных этапах снижение температуры происходит более интенсивно, что подтверждается большими значениями коэффициентов удельного веса экспонент с малыми постоянными времени и меньшими – экспонент с большими постоянными времени. Менее нагретые тела или имеющие более сложные пути отвода тепловых потоков (элементы конструкции ротора) охлаждаются менее интенсивно. Температура корпуса на начальных этапах процесса охлаждения даже возрастает за счет большего теплового потока от более нагретой обмотки статора чем тепловой поток от корпуса в окружающую среду. Через определенное время, когда экспоненциальные составляющие с малыми постоянными времени практически равны нулю, происходит выравнивание темпов охлаждения и кривые переходных процессов различных тел практически совпадают.

Следует отметить, что при больших разницах температур узлов, имеющих место при больших коэффициентах нагрузки, процесс охлаждения более интенсивный (см. на величины удельного веса экспонент). Длительность переходного процесса как правило определяется экспоненциальной составляющей с наибольшей постоянной времени. Принимая во внимание, что переходный процесс можно считать законченным, когда текущая температура составит (3-5)% от начальной, из (3) можно получить следующее выражение для времени переходного процесса  $t_n$

$$t_n = T_{\theta} \ln \frac{a_{\theta}}{0.03 \div 0.05} \quad (4)$$

В табл.3 приведены допустимое время работы и необходимое время остывания двигателя МТН-312-6, при его работе в режиме S2, полученные по результатам расчета (см. табл.1 и формулы 2 - 4).

Таблица 3 – Допустимое время работы и необходимое время остывания двигателя МТН-312-6 при его работе в режиме S2

$\beta$	1.2	1.4	1.6	2
Время работы, мин	125	46.9	25.8	8.6
Время охлаждения, мин	675	753	574	391

На основании произведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Форма кривых нагрева элементов конструкции АД существенно отличаются друг от друга, особенно на начальных этапах переходных процессов вследствие чего скорости нарастания температур могут иметь значительные отличия и, следовательно, в конце процесса нагрева имеет место перепад температур между узлами двигателя.
2. Градиент температур возрастает по мере роста коэффициента нагрузки.
3. Форма кривых охлаждения элементов конструкции АД имеет более существенные отличия, чем форма кривых нагрева вследствие различия начальных температур узлов АД.
4. Формы кривых охлаждения отдельных элементов конструкции АД в значительной степени зависят от распределения начальных температур узлов АД, существенно изменяющихся при различных коэффициентах нагрузки.
5. При повышении коэффициента нагрузки наряду с уменьшением допустимого времени работы уменьшается и время охлаждения АД за счет более интенсивного теплоотвода на начальных этапах переходного процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фёдоров М.М. Тепловые переходные процессы в узлах асинхронного двигателя при различных коэффициентах нагрузки. Сборник научных трудов ДонГТУ, серия "Электротехника и энергетика", вып.2, Донецк –1998, с. 159-165.
2. Бурковский А.Н., Ковалёв Е.Б, Коробов В.К. Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывозащищенного исполнения.- М., «Энергия», 1970.- 277 с.