

УДК 621.313.333:681.3

Федоров М.М., Денник В.Ф., Алексеев Е.Р.

Донецкий государственный технический университет, кафедра ТОЭ

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ ПРИ АНОМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

© Федоров М.М., Денник В.Ф., Алексеев Е.Р., 2000

**Розглянуто тепловий стан обмоток асинхронного двигуна при загальмованому роторі і в повторно-короткочасному режимі та ударному навантаженні і зниженій напрузі.**

При эксплуатации асинхронных двигателей (АД) имеют место различного рода аномалии такие как понижения напряжения сети, его асимметрия, работа с заторможенным ротором и т.п.. В этих режимах, как правило, существуют повышенные токовые нагрузки, вследствие которых увеличивается тепловыделение в отдельных частях АД. Тепловые процессы в подобных режимах характеризуются существенными искажениями температурного поля, когда температура отдельных узлов АД существенно отличается от температуры в номинальном режиме и может превысить допустимую. Рассмотрим некоторые типовые ситуации.

Понижение напряжения АД наряду с уменьшением потерь в стали  $p_{ст}$  приводит к повышенным потерям в обмотках, причем в роторе они растут с большей интенсивностью, чем в статоре. При работе такого двигателя в режиме с частыми пусками S4 и S5 время пуска возрастает и, следовательно, действие источников с повышенным тепловыделением более продолжительно, поэтому расчету динамики теплового состояния должен предшествовать расчет длительности пуска  $t_{п}$  и потерь в узлах АД. Исходными данными для их расчета могут быть: параметры Т-образной схемы замещения  $(R_1, X_1, R'_2, X'_2)$ , зависимость напряжения намагничивающего контура  $U_0$  от тока  $I_0$  холостого хода  $U_0(I_0)$  и потерь в стали  $p_{ст}$  от  $U_0$ , момент инерции  $J$  и зависимость момента сопротивления  $M_c$  от скольжения  $M_c(s)$ . Алгоритм расчета при произвольном напряжении питания описан ниже.

Задаются произвольными значениями скольжения  $s_i$  с шагом  $\Delta s$ . Далее следует итерационный цикл по  $U_{0i}$ . По произвольному  $U_{0i}$  определяют  $I_{0i}$  и  $p_{стi}$  и рассчитывают параметры намагничивающего контура  $R_{0i}$  и  $X_{0i}$

$$R_{0i} = p_{стi} / I_{0i}^2, \quad X_{0i} = \sqrt{(U_{0i} / I_{0i})^2 - r_{0i}^2}. \quad (1)$$

Используя метод комплексных амплитуд, определяют комплексы токов  $\underline{I}_1, \underline{I}_0, \underline{I}'_2$  и напряжение  $\underline{U}_{1i}$  по формулам

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= R_1 + jX_1, & \underline{Z}_{0i} &= R_{0i} + jX_{0i}, & \underline{Z}'_{2si} &= R'_2 / s_i + jX'_2 \\ \underline{I}_{0i} &= \underline{U}_{0i} / \underline{Z}_0; & \underline{I}'_{2i} &= \underline{U}_{0i} / \underline{Z}_{2si}; & \underline{I}_{1i} &= \underline{I}_{0i} + \underline{I}'_{2i}; & \underline{U}_{1i} &= \underline{U}_{0i} + \underline{I}_{1i} \underline{Z}_1. \end{aligned} \quad (2)$$

$\underline{U}_{1i}$  сравнивают с заданным значением  $U_1$ . При необходимости корректируют  $U_{0i}$ . Далее определяют электромагнитную мощность  $P_{эмi}$ , момент  $M_i$  и потери в обмотках статора  $p_{m1i}$  и ротора  $p_{m2i}$ .

$$P_{эмi} = \operatorname{Re} \left( \underline{U}_{0i} \underline{I}_2^{*'} \right), \quad M_i = P_{эмi} / \omega_1, \quad p_{m1i} = 3 I_{1i}^2 R_1, \quad p_{m2i} = P_{эмi} s_i, \quad (3)$$

где  $\underline{I}_2^{*}$  – сопряженный комплекс тока ротора  $\underline{I}_2'$ ;  $\omega_1$  – частота вращения поля статора.

Время пуска  $\Delta t_{пi}$  на заданном интервале  $\Delta s_i$  будет

$$\Delta t_{пi} = J \Delta s \omega_1 / (M_i - M_c(s_i)). \quad (4)$$

Время пуска и средние потери рассчитывают по формулам

$$t_{п} = \sum \Delta t_{пi}, \quad p_{m1} = (\sum p_{m1i}) / n, \quad p_{m2} = (\sum p_{m2i}) / n. \quad (5)$$

Рассмотрим динамику теплового состояния в режиме S4 на примере АД типа 4АМУ 225–4М. В табл.1 приведены значения времени пуска  $t_{п}$  при различных напряжениях и моментах сопротивления на валу ( $\beta = M_c / M_{сн}$ ).

Таблица 1

**Величины времени пуска  $t_{п}$  при различных напряжениях  
и моментах сопротивления на валу**

$\beta$	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Время пуска $t, c$					
$U_n$	0,291	0,338	0,402	0,501	0,728
$0,95U_n$	0,327	0,387	0,475	0,626	0,842
$0,9U_n$	0,371	0,45	0,575	0,989	1,348
$0,85U_n$	0,425	0,532	0,72	1,048	2,346

Из табл.1 следует естественный вывод об увеличении времени пуска  $t_{п}$  с понижением напряжения и увеличением коэффициента нагрузки  $\beta$  на валу. Так, при уменьшении напряжения до  $0,85 U_n$  время пуска при  $\beta$ , равных 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1, соответственно увеличивалось в 1,4; 1,56; 1,8; 2,1 и 3,22 раза. Существенное увеличение  $t_{п}$  имело место и с ростом нагрузки. Если при номинальном напряжении и номинальной нагрузке время пуска было больше чем при холостом ходе ( $M_c = 0,2 M_{сн}$ ) в 2,4 раза, то с уменьшением напряжения до  $0,95 U_n$ ,  $0,9 U_n$  и  $0,85 U_n$  оно соответственно возрастало в 2,51; 3,65 и 5,6 раза. Чтобы судить о динамике теплового состояния необходимо принимать во внимание, что средний ток при пуске уменьшается практически пропорционально снижению напряжения. У двигателя 4АМУ 225–4М он составлял  $5,16 I_n$ ,  $4,91 I_n$ ,  $4,65 I_n$  и  $4,39 I_n$  при напряжениях  $U_n$ ,  $0,95U_n$ ,  $0,9 U_n$  и  $0,85 U_n$ . В табл.2 приведены максимальные температуры перегрева  $\theta_{max}$  обмотки статора в цикле квазиустановившегося состояния (режим S4, ПВ=0,4) при различных коэффициентах нагрузки (0,2; 0,6 и 1) и длительностях цикла  $t_{ц}$  (10, 30, 90 и 180 с), соответствующие 360, 120, 40 и 20 включениям в час.

Из табл.2 следует, что при работе двигателя вхолостую или при относительно небольшом коэффициенте нагрузки ( $\beta < 0,6$ ) увеличение длительности пуска при снижении напряжения не приводит к существенному ухудшению динамики теплового состояния и даже есть некоторая тенденция снижения температуры обмотки статора. Однако при  $\beta > 0,9$  имеет место рост температуры с понижением напряжения. Необходимо отметить, что, как

показывают расчеты, для обмотки ротора тенденция несколько иная. Увеличение температуры с уменьшением напряжения существует даже при работе двигателя вхолостую.

Подобная картина имеет место и при несимметрии питающего напряжения. В этом случае необходимо выделить составляющие прямой и обратной последовательностей. В алгоритме расчета  $t_{\pi}$  момент определяется как  $M=M_{\text{пр}}-M_{\text{обр}}$ . При расчете момента обратной последовательности  $M_{\text{обр}}$  также используется T-образная схема замещения, но при этом скольжение принимается равным 2-с.

Таблица 2

**Максимальные температуры перегрева  $\theta_{\text{max}}$  обмотки статора  
в цикле квазиустановившегося состояния (режим S4, ПВ= 0,4)  
при различных коэффициентах нагрузки (0,2; 0,6 и 1) и длительностях цикла**

Напряжения	$t_{\text{ц}}, \text{с}$ $\beta$	Максимальные температуры перегрева в цикле $\theta, ^\circ\text{C}$			
		10	30	90	180
$U_{\text{н}}$	0,2	142,3	97,9	84	82,1
	0,6	146,8	102,8	89,2	87,5
	1	155,7	112,7	99,6	98,2
$0.95U_{\text{н}}$	0,2	135,6	95,6	83,2	81,6
	0,6	140,4	101,8	88,7	87,4
	1	150,3	111	100,7	99,7
$0.9U_{\text{н}}$	0,2	129,2	93,5	82,2	81
	0,6	134,8	99,4	88,7	87,8
	1	146,3	112,2	107,5	104,6
$0.85U_{\text{н}}$	0,2	123,3	91,2	81,6	80,7
	0,6	129,4	98,1	88,8	88,2
	1	187	127,7	118,8	111,5

Рассмотрим работу АД с неподвижным ротором, что имеет место при его заклинивании, включении АД с оборванной фазой и др. Подобные режимы характеризуются 6–8 кратными токами в обмотках, что приводит к резкому увеличению температуры. При этом опасность представляют не только абсолютные значения температур, но и скорость их нарастания  $d\theta/dt$ . Разрушение изоляции может произойти раньше, чем температура обмоток достигнет предельно допустимой. Динамику тепловых процессов можно описать с помощью эквивалентных тепловых схем (ЭТС) замещения [1]. Уравнение теплового состояния в матричной форме имеет вид

$$C \frac{d\theta}{dt} + \lambda\theta = P, \quad (7)$$

где  $\theta=(\theta_1, \dots, \theta_n)$  — матрица-столбец температур тел (узлов АД) ЭТС;  $C=(C_1, \dots, C_n)$  — матрица-столбец теплоемкостей;  $\lambda=(\lambda_{ij})$  — матрица теплопроводностей;  $P=(P_1, \dots, P_n)$  — матрица-столбец потерь;  $\frac{d\theta}{dt} = \left( \frac{d\theta_1}{dt}, \dots, \frac{d\theta_n}{dt} \right)$  — матрица-столбец производных температур.

При заторможенном роторе, когда изменение температуры имеет адиабатический характер, уравнение справедливо только на начальных этапах переходного процесса. При нулевых начальных условиях скорость нарастания температуры  $d\theta(0)/dt$  в узлах асинхрон-

ного двигателя определяется по формуле

$$\frac{d\theta(0)}{dt} = c^{-1}p. \quad (8)$$

В табл.3 приведены начальные скорости  $d\theta(0)/dt$  нарастания температуры при различных кратностях пускового тока  $\beta_{11}$  в обмотках статора и ротора на примере кранового асинхронного двигателя типа МТНЗ12-6.

Таблица 3

**Начальные скорости нарастания температуры при различных кратностях пускового тока в обмотках статора и ротора**

$\beta_{11}$		4	5	6	7	8
$d\theta(0)/dt$ , град/с	Статор	3,7	5,77	8,32	11,32	14,78
	ротор	1,65	2,57	3,71	5,05	7

При  $\beta_{11} > 6$  скорость нарастания температуры в обмотке статора превышает 8 град/с, что может привести к разрушению изоляции при температурах меньше допустимой. В табл.4 приведены зависимости  $\theta(t)$  и  $d\theta(0)/dt$  в обмотках статора и ротора в течении 30 с при  $\beta_{11} = 6$ .

Таблица 4

**Зависимости  $\theta(t)$  и  $d\theta(0)/dt$  в обмотках статора и ротора в течении 30 с при  $\beta_{11} = 6$**

t, с		0	5	10	15	20	30
$\theta$ , град	статор	0	38,3	72,4	106,4	139,6	204
	ротор	0	16,6		50,4	66,4	94,5
$d\theta/dt$ , град/с	статор	8,32	7,65	7,24	7,09	6,98	6,8
	ротор	3,71	3,52	3,41	3,36	3,32	3,15

Из табл.4 следует, что темп нарастания температуры в обмотке статора  $d\theta/dt$  сохраняется высоким и через 30 с она превышает предельно допустимую.

Периодически повторяющиеся перегрузки можно наблюдать в специальных типах АД. Их основным режимом является комбинация импульсов весьма высокой токовой (2–3 кратной) нагрузки с длительными паузами. Импульсная или ударная нагрузка непродолжительна, поэтому тепловая энергия в основном аккумулируется в обмотках. В период продолжительной паузы на начальном этапе идет резкое снижение температуры в обмотках, за счет перераспределения тепловой энергии между отдельными частями АД до тех пор, пока не установится перепад температур, соответствующий постоянному отводу тепловой энергии в окружающую среду. Этот процесс протекает довольно медленно, так что при новом набросе нагрузки начальная температура будет больше, чем в предыдущем цикле. При большом количестве включений наступает квазиустановившийся режим, когда закон изменения температуры в каждом последующем цикле повторяется (рис.1). В случае, если превышение температуры обмоток имеет место раньше, чем наступает квазиустановившийся режим, то необходимо рассматривать вопрос о допустимом числе включений. В табл.5 и 6 приведены максимальные  $\theta_{max}$  и минимальные  $\theta_{min}$  температуры обмотки статора в квазиустановившемся режиме соответственно при длительностях цикла  $t_{ц} = 30$  мин (табл.3) и 60 мин (табл.4), а также различной длительности импульса  $t_{и}$  и кратностях  $\beta_{11}$  тока статора 2; 2,5 и 3.

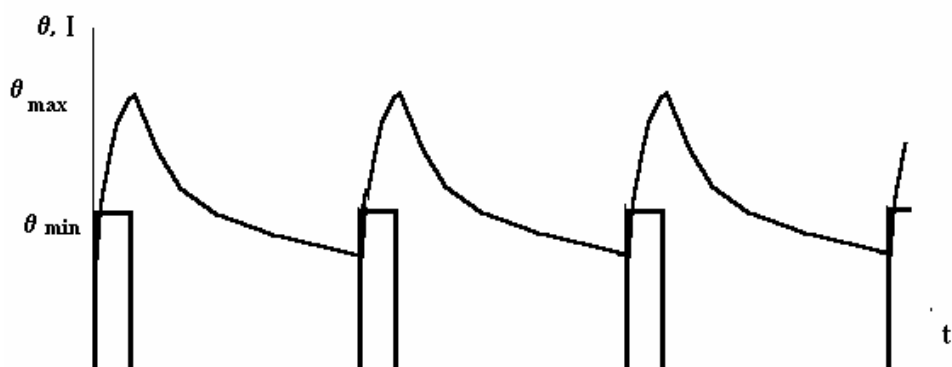


Рис.1. Квазиустановившийся режим при импульсной нагрузке.

Таблица 5

**Максимальные  $\theta_{\max}$  и минимальные  $\theta_{\min}$  температуры обмотки статора в квазиустановившемся режиме при длительностях цикла  $t_{\text{ц}} = 30$  мин и различных длительности импульса  $t_{\text{и}}$  и кратностях  $\beta_{\text{п}}$  тока статора**

$t_{\text{и}}$ , МИН		2	3	4	5	6
$\beta_{\text{п}} = 2$	$\theta_{\max}$ , град	74,7	95,3	110	122,6	132
	$\theta_{\min}$ , град	24,2	33,4	41,1	47,7	53,3
$\beta_{\text{п}} = 2,5$	$\theta_{\max}$ , град	95,9	122	141,4	156,6	168,9
	$\theta_{\min}$ , град	30,3	42	51,8	60	67,3
$\beta_{\text{п}} = 3$	$\theta_{\max}$ , град	121,7	154,7	179,1	198,2	
	$\theta_{\min}$ , град	38	52,6	64,9	73,3	

Таблица 6

**Максимальные  $\theta_{\max}$  и минимальные  $\theta_{\min}$  температуры обмотки статора в квазиустановившемся режиме при длительностях цикла  $t_{\text{ц}} = 60$  мин и различных длительности импульса  $t_{\text{и}}$  и кратностях  $\beta_{\text{п}}$  тока статора**

$t_{\text{и}}$ , МИН		2	3	4	5	6	7	8
$\beta_{\text{п}} = 2$	$\theta_{\max}$ , град	58,7	74,5	87	96,8	106	114	120,9
	$\theta_{\min}$ , град	12,9	18,7	23,9	28	21,1	36,1	39,4
$\beta_{\text{п}} = 2,5$	$\theta_{\max}$ , град	75,8	96	111,7	124,8	136	145,9	159,6
	$\theta_{\min}$ , град	16,1	23,4	30	35,8	40,9	45,5	49,6
$\beta_{\text{п}} = 3$	$\theta_{\max}$ , град	96,7	122,2	138,9	158,8	172,5	184,9	195,8
	$\theta_{\min}$ , град	20	20	35,5	44,7	51,2	56,9	62,1

Из табл.5 и 6 следует, что при перегрузках  $\beta_{\text{п}} = 2$ , в квазиустановившихся режимах температуры не превышают допустимую для изоляции класса F, используемую для двигателя 4АМУ225 – 4М, как для цикла длительностью  $t_{\text{ц}} = 60$  мин, так и для  $t_{\text{ц}} = 30$  мин. При больших перегрузках и при  $t_{\text{и}} > 5$  мин, следует решать задачи о допустимом числе включений.

Рассмотренные случаи аномальных режимов работы асинхронных двигателей показывают их существенное влияние на динамику теплового состояния. Предложенные методики позволяют дать не только качественные, но и количественные характеристики тепловых процессов в АД.

1. Ситайлов Г.А. и др. *Тепловые гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах*. М., 1989. 2. Сыромятников Н.А. *Режимы работы асинхронных электродвигателей*. М., 1987.