

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Федоров М. М., Алексеев Е. Р., Пинчук О. Г.
Донецкий Национальный Технический Университет
aer@skif.net

In the suggested work the thermal state of asynchronous motors in the repeated-brief mode in the quasisteady state in case of the change of entrance voltage is considered. Is exposed, as loading in the S3 mode in case of the change of voltage must change, that the temperature of motor knots remained permanent.

Эксплуатация асинхронных двигателей (АД) сопровождается разного вида аномалиями. Одной из наиболее встречающихся на практике аномалий является работа АД при напряжении, отличном от номинального. В результате распределение потерь, а, следовательно, и температуры в узлах АД существенно изменяются и могут превысить допустимые значения. В предлагаемой работе рассмотрены результаты исследований динамики теплового состояния в АД в повторно-кратковременном режиме при колебаниях напряжения сети.

Рабочий цикл повторно-кратковременного режима S3 характеризуется работой АД под нагрузкой в течение t_p и паузы $t_{пз}$, который периодически повторяется [1]. Тепловое состояние зависит от продолжительности включения ($ПВ = \frac{t_p}{t_{пз}}$) и величины нагрузки. Динамика тепловых процессов описывается системой дифференциальных уравнений, полученных с помощью метода эквивалентных тепловых схем замещения (ЭТС) [2], и выражается следующим образом в матричной форме:

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

где C – диагональная матрица теплоёмкостей узлов двигателей, θ – вектор-столбец превышения температуры соответствующих узлов над температурой окружающей среды τ_0 , Λ – матрица теплопроводностей узлов, P – вектор потерь мощностей узлах АД. При неподвижном роторе, в режиме охлаждения АД изменяется, величины элементов матрицы теплопроводностей Λ , а элементы вектора потерь равны 0 ($P=0$). При изменении входного напряжения частота вращения изменяется незначительно и значения теплопроводностей можно считать постоянными.

Расчет тепловых переходных процессов ведется на каждом интервале всех циклов. Особенностью является изменение распределения начальных условий температуры на каждом интервале. Расчет заканчивается по достижении квазиустановившегося состояния, когда закон изменения температуры $\theta(t)$ в каждом последующем цикле повторяется. Критерием достижения квазиустановившегося состояния, согласно Государственного стандарта, являются величины максимального и минимального значения температуры, изменение которых не превышает 2°C в течении часа.

Для расчета температур узлов АД при изменении напряжения необходимо пересчитать значения вектора потерь P . Методика расчета потерь изложена в [3].

В табл. 1 в качестве примера представлены рассчитанные средние значения температуры (θ_{cp}) узлов АД с фазным ротором МТН111-6 (пазовая часть обмотки статора – 1; пазовая часть обмотки ротора – 2; пакет железа статора – 3; железо ротора – 4; лобовая часть обмотки статора – 5; лобовая часть обмотки ротора – 6; внутренний воздух – 7; корпус – 8) в квазиустановившемся состоянии в режиме S3 ($ПВ=0.4$, $t_u=10$ мин) и установившиеся значения температур ($\theta_{уст}$) в продолжительном режиме S1 при номинальном входном напряжении ($U_1 = U_{1н}$).

Из приведенных данных можно сделать вывод, что если в режиме S1 наиболее нагретым узлом является лобовая часть обмотки статора, то в режиме S3 наиболее нагретыми узлами являются обмотки ротора, что можно объяснить худшими условиями теплоотвода в роторе.

Наибольший интерес представляют тепловые характеристики квазиустановившегося состояния обмоток АД. Основными из них, определяющими срок службы изоляционных материалов, являются максимальное (θ_{max}), минимальное (θ_{min}) и среднее значения температуры (θ_{cp}), а также размах колебаний температуры в течение цикла $\Delta\theta = \theta_{max} - \theta_{min}$.

Таблица 1 - Средние значения температуры (θ_{cp}) в режиме S3 (ПВ=0.4, $t_{ц}$ =10мин) и установившиеся значения температур ($\theta_{уст}$) в режиме S1 при $U_1 = U_{1н}$ АД МТН111-6

θ	Номер узла							
	1	2	3	4	5	6	7	8
θ_{cp}	73	96	63	92	79	95	81	51
$\theta_{уст}$	98	102	77	99	114	102	96	55

В ходе проведенных исследований выявлено, что в режиме S3 при различных напряжениях в рабочем периоде скорость изменения температуры в обмотках статора растет быстрее, чем в обмотках ротора. Однако, в период паузы большая скорость уменьшения температуры в обмотках статора, чем ротора, приводит в квазиустановившемся состоянии к более высокой температуре лобовой части обмотки ротора.

Следовательно, при изменении входного напряжения в режиме S3 в АД с фазным ротором необходимо контролировать тепловое состояние обмоток, как статора, так и ротора.

В табл. 2 в качестве примера представлены расчётные температуры лобовых частей статора и ротора АД МТН11-6 θ_{min} , θ_{max} , θ_{cp} двигателя в квазиустановившемся состоянии в режиме S3 (ПВ=0.4, $t_{ц}$ =10мин), и температуры в режиме S1 при входных напряжениях $U_1 = U_{1н}$, $U_1 = 0.9U_{1н}$ и $U_1 = 0.8U_{1н}$ в абсолютных и относительных единицах ($\theta_i^* = \frac{\theta_i}{\theta_{1н}}$). В качестве базового значения температуры узла принято значение температуры узла в режиме S1 при номинальном напряжении.

Таблица 2 - Температуры лобовой части обмоток статора и ротора АД МТН111-6 в режимах S3 (ПВ=0.4, $t_{ц}$ =10мин) и S1 при различных входных напряжениях в абсолютных и относительных единицах

№ узла	Температуры узлов АД МТН111 6											
	$U_1 = U_{1н}$				$U_1 = 0.9U_{1н}$				$U_1 = 0.8U_{1н}$			
	θ_{max}	θ_{min}	θ_{cp}	$\theta_{уст}$	θ_{max}	θ_{min}	θ_{cp}	$\theta_{уст}$	θ_{max}	θ_{min}	θ_{cp}	$\theta_{уст}$
5	95	63	79	114	107	71	89	118	135	90	112	134
	0.83	0.55	0.69	1	0.94	0.62	0.78	1.04	1.18	0.79	0.99	1.18
6	104	86	95	107	128	102	114	112	167	134	151	143
	0.97	0.8	0.89	1	1.18	0.95	1.07	1.05	1.56	1.25	1.41	1.34

Кроме аналитических расчетов были проведены экспериментальные исследования. В табл. 3 приведены экспериментальные и расчетные значения температуры лобовой части обмотки статора в режиме S3. Из результатов, приведенных в табл. 3 следует, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями находится в пределах 5-8%.

Таблица 3 - Экспериментальные и расчетные температуры лобовой части обмотки статора АД МТН111-6 в режиме S3 (ПВ=0.4, $t_{ц}$ =10мин) при различных напряжениях

	$U_1 = U_{1н}$			$U_1 = 0.9U_{1н}$			$U_1 = 0.8U_{1н}$		
	$\theta_{ма}$	θ_{min}	θ_{cp}	θ_{max}	θ_{min}	θ_{cp}	θ_{max}	θ_{min}	θ_{cp}
Расчет	95	63	79	107	71	89	134	90	112
Эксперимент	96	58	77	113	70	92	138	83	110

При уменьшении входного напряжения происходит рост температуры всех узлов двигателя. Темпы роста температуры узлов двигателя с фазным ротором в режиме S3 превосходят темпы роста установившейся температуры в режиме S1. Так, например, в двигателе МТН111-6 при снижении входного напряжения на 10% температура обмоток статора в режиме S3 растет на 10-17% (в режиме S1 темпы роста не превышают 10%). При уменьшении входного напряжения до $0.8U_{1н}$ температура обмоток статора растет на 40-50% (в режиме S1 темпы роста не превышают 20%). В обмотках ротора темпы роста температуры еще выше. При входном напряжении $U_1=0.9U_{1н}$ температура обмоток ротора растет на 20-25%, при $U_1=0.8U_{1н}$ темп роста температуры составляет 55-60% (в режиме S1 это значение не превышает 35%).

Средняя температура обмоток ротора выше, чем обмоток статора. Средняя температура пазовой и лобовой частей обмотки ротора практически совпадает. Средняя температура лобовой части обмотке статора несколько выше, чем пазовой (для АД МТН111-6 на 7°C).

Наибольший размах температуры достигается в обмотках статора. Например, в пазовой обмотке АД МТН111-6 размах температуры достигает 22°C, в лобовой - 32°C. Это связано с высокой скоростью изменения

температуры обмоток статора на начальных этапах нагрева и охлаждения. Размах температуры в обмотках роторе ниже. Например, в пазовой обмотке АД МТН111-6 размах температуры составляет 13°C, в лобовой – 18°C.

При снижении входного напряжения на 10% температура узлов статора не превышает установившуюся температуру в продолжительном режиме. Температура обмоток ротора становится больше соответствующего значения в продолжительном режиме. Например, для двигателя МТН11-6 при $U_1=0.9U_{1н}$ максимальная температура лобовой части обмотки статора увеличивается на 13% и достигает 107°C (в режиме S1 – 118°C), температура лобовой обмотки ротора растет на 23% и становится равной 128°C (в режиме S1 – 112°C).

При снижении входного напряжения на 20% максимальная температура во всех узлах превышает установившуюся температуру в продолжительном режиме. Например, для двигателя МТН111-6 при входном напряжении $U_1=0.8U_{1н}$ максимальная температура лобовой обмотки статора увеличивается на 45% и достигает 134°C, лобовой обмотки ротора на 56% и достигает 167°C. Для АД МТН111-6 при $U_1=0.8U_{1н}$ средняя температура обмоток ротора превышает предельно допустимую.

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что, как и в режиме S1 [4], при снижении входного напряжения во избежание выхода двигателя из строя, необходимо снижать нагрузку на валу. По результатам расчетов были построены зависимости $\theta_1(\beta)$ при различных входных напряжениях. Выявлено (см. табл. 4), как должна изменяться нагрузка в режимах S3 при изменении напряжения, чтобы температура лобовой части обмотки статора оставалась постоянной.

Таблица 4. Значения нагрузки в режиме S3 при напряжениях $0.9U_{1н}$, $0.8U_{1н}$ при постоянной температуре лобовой обмотки статора

№ узла	$U_1=0.9U_{1н}$				$U_1=0.8U_{1н}$			
	β	θ_{max}	θ_{min}	θ_{cp}	β	θ_{max}	θ_{min}	θ_{cp}
5	0.94	94	63	79	0.83	94	63	79
6		111	90	100		114	93	103

Для безопасной эксплуатации двигателя в режиме S3 нагрузку на валу следует снижать в большей степени, чем в режиме S1 [4].

Из вышеизложенного следует:

- наибольшие тепловые перегрузки в повторно-кратковременном режиме S3 испытывают обмотки ротора (в продолжительном режиме при напряжениях $U_1=U_{1н}$, $U_1=0.9U_{1н}$ наиболее нагретыми являются обмотки статора);
- снижение входного напряжения сопровождается ростом температуры узлов АД, наибольшие темпы роста наблюдаются в обмотках ротора;
- разность между максимальной и минимальной температурой пазовой и лобовой обмоток статора выше, чем соответствующих обмоток ротора;

Таким образом, если двигатель с фазным ротором МТН111-6 в режиме S3 ($t_{н}=10$ мин, ПВ=0.4) можно эксплуатировать при номинальном входном напряжении без перегрева обмоток статора и ротора, то его безаварийная эксплуатация при входных напряжениях $U_1 < 0.9U_{1н}$ возможна при понижении нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдберг О. Д. Испытания электрических машин. — М.: Высшая школа, 2000. - 256 с.
2. Бурковский А. И., Ковалёв Е. Б., Коробов В. К. Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывоопасного исполнения. М., Энергия, 1970. - 184 с.
3. Федоров М. М., Алексеев Е. Р., Горелов М. В. Пусковые и рабочие характеристики асинхронных двигателей при различных напряжениях сети. // Труды Донецкого государственного технического университета, серия «Электротехника и энергетика», выпуск 4.- Донецк. - 1999. - С. 123-126.
4. Федоров М. М., Алексеев Е. Р. Тепловое состояние асинхронных двигателей при изменении напряжения сети // Збірник наукових праць ДонДТУ, серія: «Електротехніка і енергетика», випуск 17.- Донецьк, ДонДТУ. - 2000. - С. 82-86.