

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ

Федоров М. М., Алексеев Е. Р.

Донецкий государственный технический университет

aer@skif.net

In the article offered the characteristics of thermal condition asynchronous motors under different circuit voltages in steady regime under constant loading and stator current are given. The estimation of thermal condition dynamic under circuit voltage variations in the motor modules is given with help of heating and cooling curves.

Тепловое состояние изоляции обмоток асинхронного двигателя (АД) является важнейшим фактором определяющим его надёжную эксплуатацию. Источниками тепла в АД являются потери в его узлах. Колебание напряжения в значительной степени влияет на их величину [4]. Так при понижении имеет место значительное повышение потерь, а следовательно и температуры в обмотке ротора, что важно для двигателей с фазным ротором. В предлагаемой работе рассмотрены результаты исследований теплового состояния в АД при колебаниях напряжения сети в различных режимах работы.

При анализе теплового состояния использованы результаты аналитических и экспериментальных исследований. Расчёты теплового состояния осуществлялись с помощью эквивалентных тепловых схем замещения (ЭТС) электрических машин [3]. Для АД с фазным ротором МТН 111-6 была принята восьмизвёздчатая ЭТС. Температура, в которых рассчитывались температуры, были выбраны следующие узлы АД: 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.

Система дифференциальных уравнений в матричном виде, полученная с помощью ЭТС, описывающих тепловые процессы при нагреве в узлах АД имеет вид.

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

Здесь $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_8)$ – вектор столбец превышения температур соответствующих узлов над температурой окружающей среды θ_0 ; $\Lambda = (\lambda_{ij})$ – матрица теплопроводностей ЭТС АД МТН 111-6; $C = (C_1, \dots, C_8)$ – вектор-столбец теплоёмкостей узлов двигателей; $P = (P_1, \dots, P_8)$ – вектор потерь мощностей в узлах АД.

Расчёт температур в установившемся состоянии также осуществляется с помощью (1). При этом принимается во внимание, что $\frac{d\theta_i}{dt} = 0$. При неподвижном роторе, в режиме охлаждения АД изменяется, величины элементов матрицы теплопроводностей Λ , а элементы вектора потерь равны 0 ($P=0$).

Пассивные параметры модели (теплоёмкости C_i и теплопроводности λ_{ij}) неизменны для всех двигателей одного типоразмера. Кроме того, теплопроводности зависят от режима охлаждения. В АД МТН 111-6 предусмотрена самовентиляция, т. е. имеет место два основных режима охлаждения: при включённом АД и практически неизменной частоте вращения, а также при неподвижном роторе в период пауз. Источниками тепловой энергии в АД являются потери в узлах. В общем случае разделяют на переменные $P_{пер}$ (в обмотках статора и ротора), постоянные $P_{пост}$ и добавочные $P_{доб}$. Их величины определяются значениями нагрузки, напряжения сети и др. Эти потери могут рассчитываться аналитически [4] или по результатам экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования проводились под нагрузкой при различных напряжениях и постоянстве момента на валу ($M_c = const$) (или тока статора). В ходе испытаний, с помощью встроенных датчиков температуры, снимались кривые нагрева $\theta_{нг}(t)$ в лобовой части обмотки статора, а в установившемся рабочие характеристики АД. Кроме того, после остановки двигателя, снимались кривые охлаждения $\theta_{ох}(t)$. Кривые нагрева и охлаждения представляют своеобразные весовые функции и позволяют судить о характере динамики тепловых процессов в узлах АД при различных режимах работы. Для качественного анализа кривые аппроксимируются аналитическими выражениями [1], состоящими из двух экспонент с большими ($T_{1нг}$ и $T_{1ох}$) и малыми ($T_{2нг}$ и $T_{2ох}$) постоянными времени.

$$\begin{aligned} \theta_{нг}(t) &= \theta_{уст} (1 - a_{1нг} \exp(-t/T_{1нг}) - a_{2нг} \exp(-t/T_{2нг})) \\ \theta_{ох}(t) &= \theta_{уст} (a_{1ох} \exp(-t/T_{1ох}) + a_{2ох} \exp(-t/T_{2ох})) \end{aligned} \quad (2)$$

Экспоненциальные составляющие с большой постоянной времени позволяют судить о длительности тепловых переходных процессов ($t_{ПП}$). Согласно Государственному стандарту переходный процесс считается законченным, когда изменение температуры не превышает 1°C в течении часа. Тогда длительность переходного процесса $t_{ПП}$ может быть рассчитана по формуле:

$$t_{ПП} = T_1 \ln(\theta_{УСТ} a_1 (1 - \exp(-60/T_1))) \quad (3)$$

Составляющие с малой постоянной времени в значительной степени определяют скорость изменения температуры на начальных этапах переходного процесса, что особенно важно повторно-кратковременных режимах работы, когда тепловые процессы в электрических машинах постоянно меняются. В момент времени $t=0$ скорость изменения определяется по формуле:

$$\frac{d\theta}{dt} = \left(\frac{a_1}{T_1} + \frac{a_2}{T_2} \right) \theta_{УСТ} \quad (4)$$

Результаты экспериментальных исследований позволяют ввести коррективы в расчёт пассивных параметров ЭТС, а также распределений потерь в узлах АД, что даёт возможность повысить точность расчётов.

В табл. 1 приведены расчётные значения установившихся температур в узлах АД при различных коэффициентах нагрузки β и напряжениях $U_H, 0.8U_H$. Из табл. 1 следует, что при номинальном напряжении и $\beta = 1$ наибольшие температуры имеют место в лобовой части обмотки статора. При возрастании нагрузки степень увеличения температуры в узлах ротора больше чем статора. Снижение напряжения приводит к повышению температур при всех значениях коэффициентов нагрузки. Минимальные температуры в узлах АД имеют место при $(0.9-1)U_H$. На рис. 1 приведены зависимости относительных значений установившихся температур

$\left(\frac{\theta_{УСТ}}{\theta_{УСТН}} = \theta_{УСТ}^* \right)$ от напряжения U $\theta_{УСТ}^* = f(U)$ в различных узлах АД.

Таблица 1 – Установившиеся значения температур в узлах АД при входных напряжениях $U_H, 0.8U_H$ для различных коэффициентов нагрузки β

№ узла	Установившиеся температуры $\theta_{УСТ}$ узлов АД													
	$\beta = 1.4$		$\beta = 1.2$		$\beta = 1$		$\beta = 0.9$		$\beta = 0.8$		$\beta = 0.6$		$\beta = 0.4$	
	U_H	$0.8U_H$	U_H	$0.8U_H$	U_H	$0.8U_H$	U_H	$0.8U_H$	U_H	$0.8U_H$	U_H	$0.8U_H$	U_H	$0.8U_H$
1	149	234	122	162	98	112	87	96	83	82	70	57	61	41
2	182	302	142	204	102	136	92	115	85	96	67	62	54	41
3	117	182	96	127	77	88	69	76	65	65	56	46	49	33
4	172	289	135	196	99	130	89	111	82	92	66	60	53	40
5	177	285	143	196	114	134	101	115	95	97	80	66	68	46
6	182	293	142	198	102	132	92	112	86	93	68	61	55	40
7	162	280	128	190	96	127	86	108	81	90	66	59	54	40
8	85	136	169	94	55	64	49	55	47	47	39	33	34	23

На рис. 1 представлены зависимости температур различных узлов АД от входного напряжения при номинальной нагрузке относительных координатах.

При номинальном входном напряжении и номинальной нагрузке температура лобовой части обмотки статора составляет 114°C , при снижении входного напряжения на 10% температура увеличивается на 3% и составляет 118°C , при уменьшении входного напряжения до $0.8U_H$ температура увеличивается на 18% и составляет 134°C . Температура пазовой части обмотки ротора при номинальном входном напряжении равна 107°C . При $U=0.9U_H$ температура увеличивается на 6.5% и составляет 117°C , при уменьшении входного напряжения до $0.8U_H$ температура пазовой части обмотки ротора увеличивается на 25% и составляет 136°C , что уже выше температуры лобовой части обмотки статора при соответствующем входном напряжении. Из всего вышеизложенного можно сделать следующий вывод: понижение входного напряжения на 10% приводит к незначительному росту (в пределах 3-9%) температур узлов. Однако, дальнейшее уменьшение входного напряжения приводит к большему увеличению температур (особенно температур в роторе и температуры внутреннего воздуха) на 23-28%, что приводит к перераспределению поля температур АД. Так при номинальном режиме наиболее нагретой частью АД является лобовая часть обмотки статора. При понижении входного напряжения на 20% наиболее нагретой частью двигателя становится пазовая часть обмотки ротора. Температура статора при этом в среднем возрастает на 14%, а температура ротора – на 25-26%.

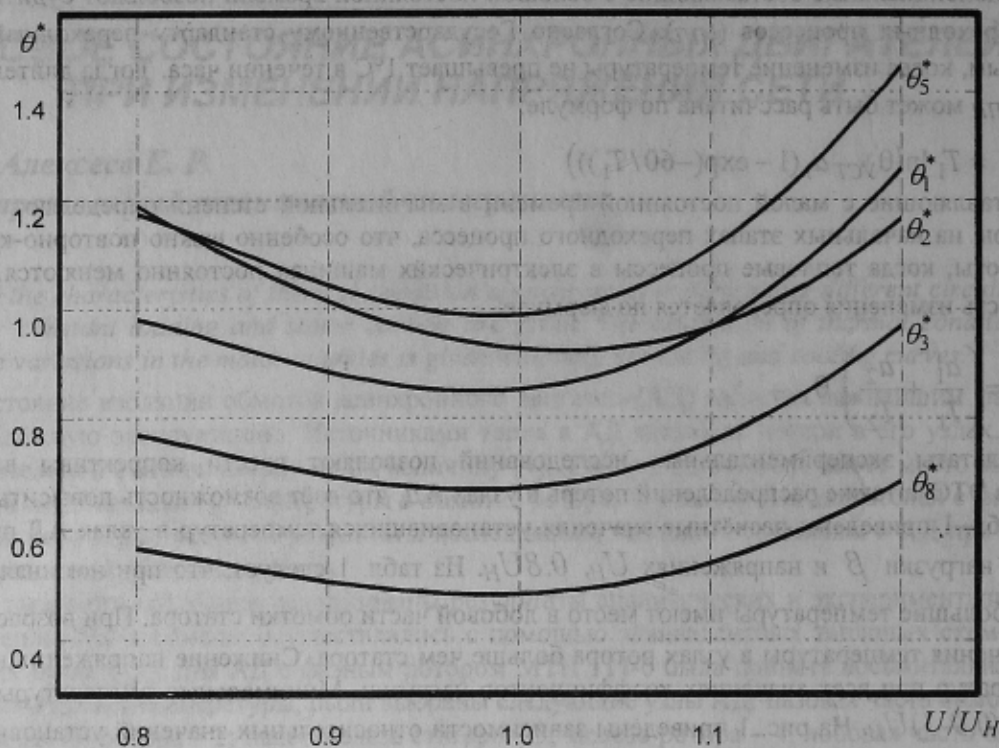


Рисунок 1 – Зависимость температуры в узлах АД от входного напряжения U при $\beta = 1$.

По результатам расчётов были построены зависимости $\theta_i(\beta)$ при различных входных напряжениях. Эти зависимости (в относительных единицах) с высокой степенью точности могут быть аппроксимированы с помощью полинома четвёртой степени $\theta_i = a_0 + a_1\beta + a_2\beta^2 + a_3\beta^3 + a_4\beta^4$. Получив коэффициенты аппроксимирующих зависимостей $\theta_i(\beta)$, определим, как должна изменяться нагрузка при изменении напряжения, чтобы температура соответствующего узла оставалась неизменной. Наиболее характерными узлами АД МТН111-6 являются пазовая часть обмотки ротора и лобовая часть обмотки статора. В таблице 2 приведены значения необходимых коэффициентов нагрузки, соответствующие входных напряжений при условии постоянства температур в пазовой части обмотки ротора и лобовой части обмотки статора.

Таблица 2 – Зависимость $\beta(U)$ при условии постоянства температур в пазовой части обмотки ротора и лобовой части обмотки статора

		$U=0.8U_n$	$U=0.9U_n$	$U=U_n$	$U=1.1U_n$
Коэффициент нагрузки β	$\theta_3 = const$	0.897	0.986	1	0.832
	$\theta_2 = const$	0.867	0.972	1	0.992

На рис. 2 приведены графики зависимостей $\beta(U)$ при условии постоянства температур в пазовой части обмотки ротора и лобовой части обмотки статора.

При снижении и повышении входного напряжения необходимо снижать нагрузку во избежание перегрева отдельных узлов двигателя МТН111-6. При снижении входного напряжения на 10% можно снизить нагрузку на 2.8%, при этом температура в роторе не изменится, а температура в статоре уменьшится на 2%, а можно снизить нагрузку на 1.4%, при этом температура в статоре останется номинальной, а температура в роторе увеличится на 2.5%. Снижение входного напряжения на 10% приводит к небольшому увеличению температур и легко компенсируется небольшим снижением нагрузки. При снижении входного напряжения на 20% можно снизить нагрузку на 10.3%, при этом температура АД в статоре не изменится, а температура в роторе возрастёт на 6%. Если снизить нагрузку на 13.3%, то температура в роторе не изменится, а температура в статоре даже уменьшится на 16%. При понижении входного напряжения на 20% уменьшением нагрузки (на 10-13%) можно добиться постоянства температуры в узлах АД.

Интерес представляют установившиеся температуры в узлах АД при изменении напряжений и постоянном токе статора ($I_1 = const$), который является основным контролируемым параметром при эксплуатации АД. В табл. 3 приведены расчётные установившиеся температуры в лобовой части обмотки статора и пазовой

части обмотки ротора при напряжениях $U_H, 0.9U_H, 0.8U_H$ и номинальном токе статора ($I_1 = I_{1H}$). Значения температур приведены в абсолютных и относительных единицах. В табл. 3 также приведены установившиеся температуры в лобовой части обмотки статора в аналогичных условиях, полученные экспериментальным путём.

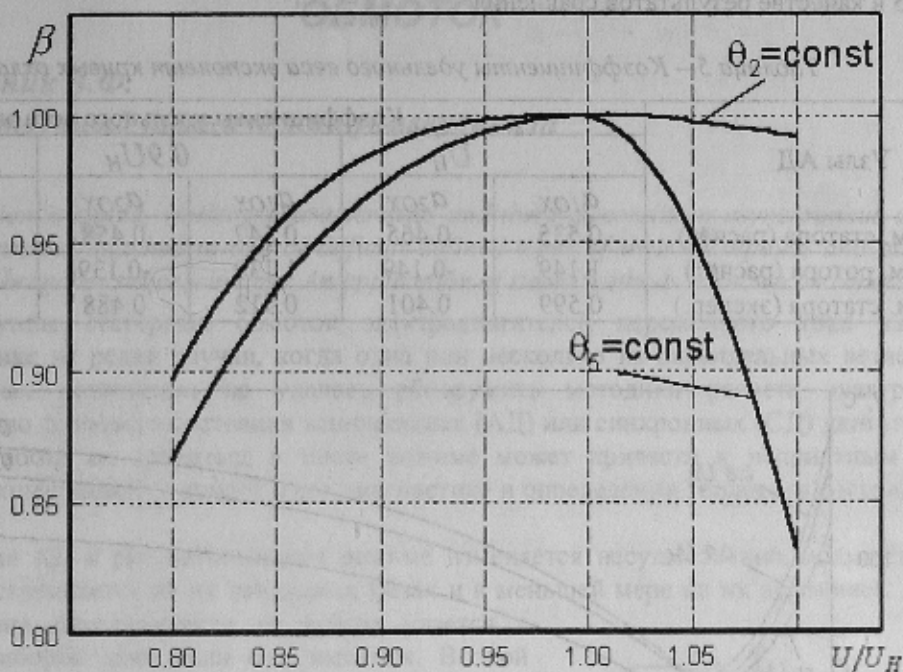


Рисунок 2 – Графики зависимостей $\beta(U)$ при условии $\theta_2, \theta_5 = \text{const}$

Таблица 3 – Установившиеся значения температур при $U_H, 0.9U_H, 0.8U_H$ и $I_1 = I_{1H}$

Узлы АД	Установившиеся температуры					
	U_H		$0.9U_H$		$0.8U_H$	
	$\theta_{уст},$ °C	$\frac{\theta_{уст}}{\theta_{устH}}$	$\theta_{уст},$ °C	$\frac{\theta_{уст}}{\theta_{устH}}$	$\theta_{уст},$ °C	$\frac{\theta_{уст}}{\theta_{устH}}$
Лоб. часть обм. статора (расчет)	114	1	135	1.18	140	1.21
Паз. часть обм. ротора (расчёт)	102	1	133	1.3	143	1.4
Лоб. часть обм. статора (экспер.)	112	1	130	1.16	139	1.24

Из табл. 3 следует, что при уменьшении напряжения и $I_1 = I_{1H}$ имеют место значительные увеличения температур. При этом обмотка ротора испытывает более высокие тепловые нагрузки, чем обмотка статора.

Оценка динамических свойств тепловых процессов осуществлялась с помощью кривых нагрева и охлаждения, получаемых путём решения системы уравнений (1). При расчёте использовались численные методы (метод Рунге-Кутты четвёртого порядка с автоматическим выбором шага) [2]. Полученные кривые аппроксимировались аналитическими выражениями (2). Большая и малая постоянные времени для всех кривых нагрева охлаждения применялись одинаковые, что давало возможность осуществлять сравнительную оценку формы кривых переходных процессов по величине коэффициентов удельного веса экспонент a_1, a_2 .

В табл. 4 приведены коэффициенты удельного веса экспонент $a_{1HГ}$ и $a_{2HГ}$ кривых нагрева лобовой части обмотки статора и пазовой части обмотки ротора при напряжениях $U_H, 0.9U_H, 0.8U_H$ и $\beta = 1$. Величины больших постоянных времени были приняты равными $T_{1HГ} = 53$ мин, а малых – $T_{2HГ} = 2.8$ мин.

Таблица 4 – Коэффициенты удельного веса экспонент кривых нагрева.

Узлы АД	Коэффициенты удельного веса экспонент					
	U_H		$0.9U_H$		$0.8U_H$	
	$a_{1HГ}$	$a_{2HГ}$	$a_{1HГ}$	$a_{2HГ}$	$a_{1HГ}$	$a_{2HГ}$
Лоб. часть обм. статора (расчёт)	0.802	0.198	0.811	0.189	0.846	0.154
Паз. часть обм. ротора (расчёт)	1.036	-0.036	1.026	-0.026	0.979	0.021
Лоб. часть обм. статора (экспер.)	0.827	0.173	0.837	0.167	0.884	0.116

В табл. 5 приведены коэффициенты удельного веса экспонент кривых охлаждения при тех же напряжениях. Большие постоянные времени принятыми равными $T_{10X}=138$ мин., а малые – $T_{20X}=10.7$ мин.

На рис. 3 приведены экспериментальные кривые лобовой части обмотки статора. Также, как и расчётные они были аппроксимированы аналитическими с теми же постоянными времени и внесены соответственно в табл. 4 и табл. 5 в качестве результатов сравнения.

Таблица 5 – Коэффициенты удельного веса экспонент кривых охлаждения.

Узлы АД	Коэффициенты удельного веса экспонент					
	U_H		$0.9U_H$		$0.8U_H$	
	a_{10X}	a_{20X}	a_{10X}	a_{20X}	a_{10X}	a_{20X}
Лоб. часть обм. статора (расчёт)	0.535	0.465	0.542	0.458	0.549	0.451
Паз. часть обм. ротора (расчёт)	1.149	-0.149	1.139	-0.139	1.113	-0.113
Лоб. часть обм. статора (экспер.)	0.599	0.401	0.512	0.488	0.502	0.498

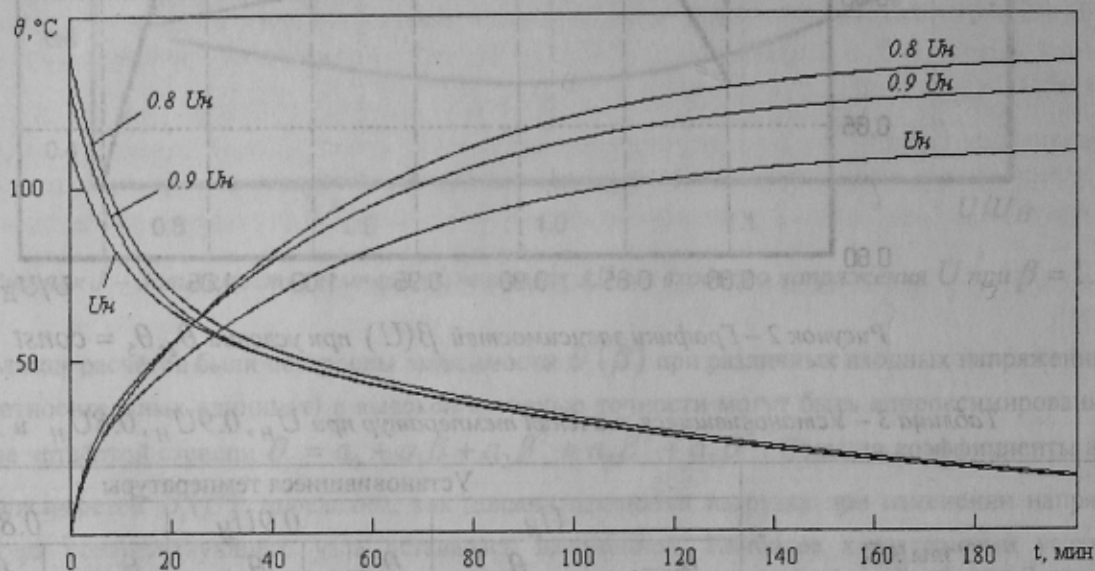


Рисунок 3 – Экспериментальные кривые нагрева и охлаждения АД МТН111-6

Из вышеизложенного следует, что форма кривых нагрева и охлаждения в обмотках статора и ротора существенна на начальных этапах переходного процесса. Коэффициенты удельного веса экспоненты с малой постоянной времени у кривых нагрева узлов ротора значительно меньше, а зачастую имеют отрицательные значения. Это означает, что скорость нарастания температуры на начальных этапах переходного процесса в роторе меньше, чем в узлах статора. При уменьшении напряжения наблюдается некоторая тенденция сближения форм кривых. Ещё большие различия форм кривых статора и ротора имеют место при охлаждении. При этом изменение напряжения не существенно влияет на форму кривых, которые практически совпадают при $t > 60$ мин. Экспериментальные кривые подтверждают справедливость расчётов.

Приведенные выше результаты исследований позволяют сделать вывод о значительном влиянии напряжения сети на статические и динамические характеристики теплового состояния. При понижении напряжения сети имеет место существенное увеличение тепловых нагрузок, особенно в узлах ротора. При эксплуатации АД весьма желательно проводить контроль температур обмоток, так как даже при наличии щитовых приборов, контролирующих ток статора при $I=I_H$ возможны существенные превышения температуры уже при напряжениях равных $0.9U_H$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Е. Р. Математические модели анализа кривых тепловых переходных процессов в узлах электрических машин при пониженных напряжениях. Наукові праці Державного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка, випуск 6., Донецьк, 1999, с. 304–309.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М., Наука, 1984, 832с.
3. Счастливый Г. Г. Нагревание закрытых асинхронных электродвигателей. Киев, Наукова думка, 1966, 196с.
4. 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.