

УДК 621.313.333.018

О.Г. Пинчук*Донецкий национальный технический университет**ул. Артема, 74, г. Донецк, Украина, 83000**E-mail: OlgaPinchuk@yandex.ru***ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ ПРИ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ**

Рассматривается оценка влияния напряжений прямой и обратной последовательности, сдвига по фазе между ними на тепловое состояние и срок службы асинхронных двигателей общепромышленного исполнения мощностью 1...400 кВт в повторно-кратковременном режиме S3 при несимметрии питающего напряжения.

Тепловое состояние обмоток асинхронных двигателей (АД) является важнейшим фактором, определяющим их надежную эксплуатацию. Прогнозирование теплового состояния обмоток позволяет исключить их тепловую перегрузку в тяжелых режимах работы, одним из которых является повторно-кратковременный режим S3 при несимметричном питающем напряжении.

В качестве меры несимметрии напряжений используют коэффициент несимметрии обратной последовательности K_{2U} равный отношению напряжения обратной последовательности $U_{обр}$ к напряжению прямой последовательности $U_{пр}$ [1]:

$$K_{2U} = \frac{U_{обр}}{U_{пр}} 100\% . \quad (1)$$

При этом подразумевается [1], что сдвиг по фазе $\Delta\psi = \psi_{U_{пр}} - \psi_{U_{обр}}$ между $U_{пр}$ и $U_{обр}$ равен 0. Однако на практике имеет место изменение напряжений прямой и обратной последовательности не только по величине, но и по фазе. Практика эксплуатации свидетельствует, что величина напряжения $U_{пр}$ может быть на 10...20% ниже номинального, при этом величина K_{2U} может достигать свыше 28%. Проведенные в [2] исследования показали, что на нагрев двигателя влияют не только величины напряжений $U_{пр}$ и $U_{обр}$, но и сдвиг по фазе $\Delta\psi$ между ними. Предложена методика [2], позволяющая определить значение $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$, которое соответствует максимальным тепловым нагрузкам АД при заданном уровне несимметрии.

Анализ научных работ показал, что вопросы, связанные с эксплуатацией АД в повторно-кратковременных режимах работы при асимметрии источника питания практически не освещены в литературе. В работах Федорова М.М., Алексеева Е.Р. [3] внимание уделено оценке влияния величины $U_{пр}$ на распределение температур в повторно-кратковременном режиме работы S3. Однако тепловое состояние АД при изменении $U_{пр}$ и несимметричном напряжении питания не было рассмотрено ни в одной из работ. Интерес представляет изучение эксплуатации АД в случае одновременного изменения характеристик ($U_{пр}$, K_{2U}) при $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$. Практически отсутствуют сведения об особенностях эксплуатации АД в повторно-кратковременных режимах при различной продолжительности включения (ПВ). Поэтому интересны вопросы, связанные с определением допустимых значений нагрузки на валу электродвигателя при различных параметрах несимметрии напряжения сети ($U_{пр}$, K_{2U} , $\Delta\psi$).

Целью данной работы была оценка теплового состояния в повторно-кратковременном режиме S3 при различных характеристиках несимметрии напряжения сети ($U_{пр}$, K_{2U} , $\Delta\psi$).

Согласно ГОСТ 183-74, в повторно-кратковременном режиме S3 цикл работы (t_u) равен сумме рабочего периода (t_p) и паузы (t_n). Повторно-кратковременный режим характеризуется продолжительностью включения $PВ = \frac{t_p}{t_u} \cdot 100\%$. Согласно ГОСТ 183-74 $t_u = 10$ мин. В результате

действия многократных периодически повторяющихся нагрузок в электрической машине имеет место квазиустановившееся состояние. При достижении квазиустановившегося состояния двигатель испытывает наибольшие тепловые перегрузки, поэтому с точки зрения надежности оно представляет значительный практический интерес. Для анализа теплового состояния АД в повторно-кратковременном режиме необходимо вычислить максимальное (θ_{max}), минимальное (θ_{min}) и среднее (θ_{cp}) значения температуры узлов АД и размах изменения температуры в квазиустановившемся состоянии при различных несимметричных напряжениях.

Расчёт теплового состояния АД осуществлялся с помощью системы дифференциальных уравнений, полученных на основании эквивалентной тепловой схемы (ЭТС) [3]. Для этого использовалась ЭТС, разработанная проф. Федоровым М.М., которая позволяет учесть неравномерный нагрев электродвигателя при различных характеристиках несимметрии источника питания [3]. Ее особенностью является тот факт, что в виде отдельных узлов выделены элементы конструкции каждой

фазы статора. Это связано с тем, что мощность источников тепла в обмотках статора при несимметрии может иметь существенные отличия. Например, для двигателя с фазным ротором в качестве узлов были выбраны [3]: 1, 2, 3 – пазовые части обмоток статора; 4, 5, 6 – пазовые части обмоток ротора; 7 – пакет статора; 8 – пакет ротора; 9, 10, 11 – лобовые части обмоток статора; 12, 13, 14 – лобовые части обмоток ротора; 15 – внутренний воздух; 16 – корпус. Система дифференциальных уравнений в матричном виде, полученная с помощью ЭТС, описывающих тепловые процессы при нагреве и охлаждении в узлах АД, имеет вид [3]:

$$C \frac{d\theta}{dt} + \Lambda \theta = P, \quad (2)$$

где $(\theta_1, \dots, \theta_8)^T$ – вектор-столбец превышения температур соответствующих узлов над температурой окружающей среды θ_0 ; C – диагональная матрица теплоемкостей узлов двигателей; $\Lambda = (\lambda_{ij})$ – матрица теплопроводностей ЭТС АД; $P = (p_1, \dots, p_8)^T$. При работе под нагрузкой $P = P_{ном}$ элементы вектора потерь равны $P = P_{ном}$, а в режиме охлаждения $P = 0$.

Расчет токов и потерь осуществлялся методом симметричных составляющих с применением Т-образной схемы замещения [4]. Величина коэффициента нагрузки на рабочем интервале цикла в режиме S3 для различных ПВ (таблица 1) подбиралась из условия равенства сроку службы в продолжительном режиме S1 ($D^* = 1$). Значения токов при симметричном напряжении сети в режиме S3, при условии, что $D^* = 1$, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Номинальные значения токов для режимов S3 и S1

Режим работы	S1	S3 (ПВ–60)	S3 (ПВ–40)	S3 (ПВ–25)
I_1, A	11	13	16	20

В качестве примера в таблице 2 представлены величины токов обратной последовательности статора при различных значениях K_{2U} и ПВ. В качестве базовых были приняты номинальные значения токов при соответствующих ПВ из таблицы 1.

Таблица 2 – Величины токов статора обратной последовательности АД МТН 111–6 в абсолютных и относительных единицах при различных значениях K_{2U} и ПВ

$K_{2U}, \%$	S1		S3 (ПВ–60)		S3 (ПВ–40)		S3 (ПВ–25)	
$I_{1обр}$	$I_{1обр} / I_{1н}$	$I_{1обр}, A$	$I_{1обр} / I_{1н}$	$I_{1обр}, A$	$I_{1обр} / I_{1н}$	$I_{1обр}, A$	$I_{1обр} / I_{1н}$	$I_{1обр}, A$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,16	1,8	0,13	1,8	0,11	1,8	0,09	1,8
10	0,39	4,3	0,33	4,3	0,27	4,3	0,22	4,3
15	0,58	6,4	0,49	6,4	0,41	6,4	0,30	6,4

В диапазоне значений $\beta = 0,5 \dots 2,0$ величина тока обратной последовательности не зависит от нагрузки на валу АД, поэтому абсолютное значение тока обратной последовательности остается постоянным при любой продолжительности включения (таблица 2). Тогда относительное значение тока ($I_{1обр}$) снижается при увеличении ПВ (таблица 2). В результате (рисунки 1, 2), большие темпы роста токов в обмотках электродвигателя при несимметрии сети наблюдаются при увеличении ПВ.

Расчётные превышения температур θ_{min} , θ_{max} , θ_{cp} лобовой части наиболее нагруженной фазы статора и лобовой части обмоток ротора АД МТН 111–6 в квазиустановившемся состоянии в режиме S3 ($t_{\psi} = 10$ мин, ПВ = 25 %, 40 %, 60 %) при различных значениях K_{2U} ($U_{np} = U_n$, $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$) в абсолютных и относительных единицах ($\theta_i^* = \frac{\theta_i}{\theta_B}$) представлены в таблице 3. Для сравнения в таблице 3 представлены также величины установившихся температур в продолжительном режиме S1. В качестве базового значения температуры принята установившаяся температура лобовой части обмотки статора в режиме S1 при симметричном напряжении сети ($\theta_B = 114^\circ C$).

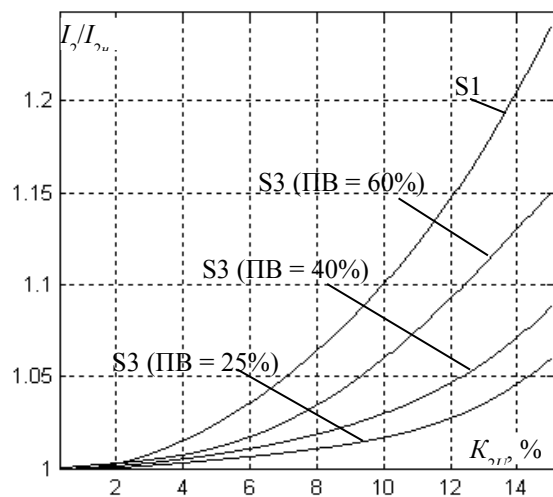


Рисунок 1 – Графики зависимости тока в обмотках ротора в режимах S1 и S3 (ПВ = 60%; 40%; 25%) при $U_{np} = U_n$, $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ и различных K_{2U}

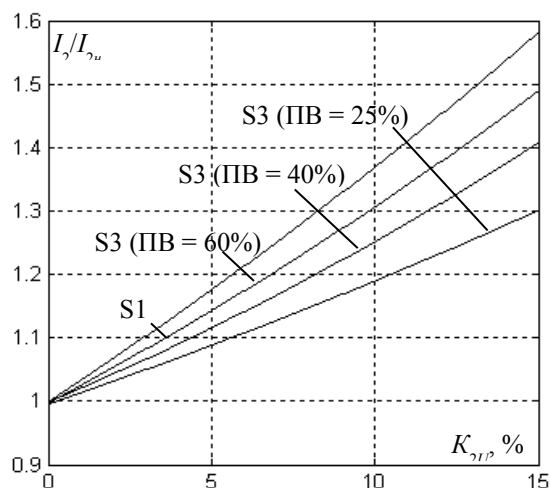


Рисунок 2 – Графики зависимости тока наиболее нагруженной фазы статора в режимах S1 и S3 (ПВ = 60%; 40%; 25%) при $U_{np} = U_n$, $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ и различных K_{2U}

Таблица 3 – Превышения температуры лобовой части наиболее нагруженной фазы статора и обмоток ротора АД МТН111–6 в режиме S3 ($t_u = 10$ мин, ПВ = 25%, 40%, 60%) при $U_{np} = U_n$, $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ и различных значениях K_{2U}

K_{2U} , %	Узлы	Превышения температуры узлов АД МТН111–6									
		S1	S3 (ПВ = 60%)			S3 (ПВ = 40%)			S3 (ПВ = 25%)		
		$\theta_{уст}$	θ_{max}	θ_{min}	θ_{cp}	θ_{max}	θ_{min}	θ_{cp}	θ_{max}	θ_{min}	θ_{cp}
0	Статор	114,0/1,00	110/0,94	78/ 0,68	93/ 0,82	115/1,01	74/ 0,65	93/0,82	123/1,08	71/0,62	93/0,82
	Ротор	111,0/0,97	118/0,95	80/0,70	95/0,83	123/1,08	77/ 0,68	97/ 0,85	142/1,25	76/0,67	98/0,86
2	Статор	118,8/1,08	111/0,97	80/0,70	96/0,84	120/1,05	74/ 0,64	93/ 0,82	128/1,12	72/0,63	95/0,83
	Ротор	112,6/0,99	118/0,95	81/0,71	96/0,84	123/1,08	78/ 0,68	97/ 0,86	143/1,25	77/0,68	99/0,87
7	Статор	148,5/1,35	130/1,14	87/0,76	110/0,97	138/1,21	79/ 0,69	106/0,92	144/1,26	75/0,66	109/0,96
	Ротор	125,2/1,10	127/1,03	87/0,76	103/0,90	131/1,15	82/ 0,72	103/0,90	148/1,3	79/0,69	102/0,96
15	Статор	246,1/2,24	186/1,63	117/1,03	153/1,34	152,5/1,34	99,2/0,87	136,5/1,20	183/1,60	86/0,75	125/1,10
	Ротор	186,1/1,63	153/1,34	113/0,99	134/1,18	147,0/1,29	102,5/0,90	125,4/1,10	169/1,48	91/0,8	120/1,05

Из данных, представленных в таблице 3, следует, что при номинальном напряжении сети в режиме S3 и любых ПВ наиболее нагретым узлом АД с фазным ротором является лобовая часть обмотки ротора (для двигателя МТН 111-6 при ПВ=25 % среднее значение превышения температуры лобовой части обмотки ротора равно 98°C, при ПВ=40 % равно 97°C, а при ПВ=60 % – 95°C). При асимметрии напряжения свыше 4...8 % наиболее нагретым узлом становится лобовая часть одной из фаз статора. При

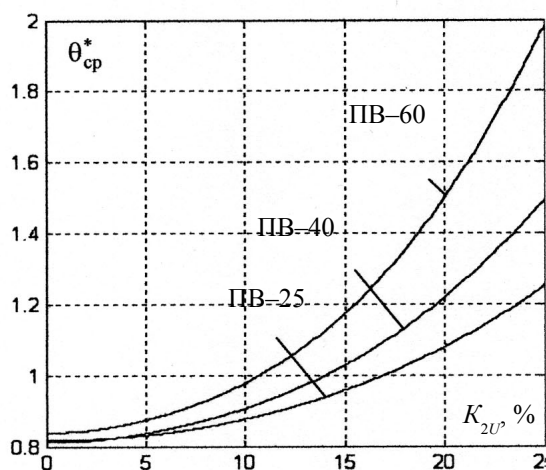


Рисунок 3 – Средние температуры в обмотках ротора при различных значениях K_{2U} и ПВ АД МТН 111-6 в режиме S3

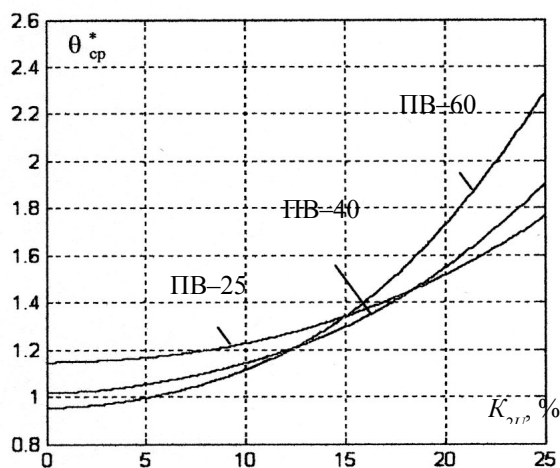


Рисунок 4 – Максимальные температуры в обмотках ротора при различных K_{2U} и ПВ АД МТН 111-6 в режиме S3

Таблица 5 – Максимальные температуры наиболее нагруженной фазы статора АД МТН 111-6 в режиме S3 (двигатель, ПВ=25% и 40%, 60%) при $t_u = 10$ мин. Температуры лобовой части статора при симметричном напряжении сети равны 118 °С, 123 °С, 142 °С соответственно при ПВ = 60%, 40%, 25%. При несимметрии сети 20% максимальные температуры ротора достигают 172 °С, 161 °С, 152 °С.

напряжения сети	узлы	$U_{np} = U_n$							
		$K_{2U} = 0\%$	$K_{2U} = 5\%$	$K_{2U} = 10\%$	$K_{2U} = 15\%$	$K_{2U} = 0\%$	$K_{2U} = 5\%$	$K_{2U} = 10\%$	$K_{2U} = 15\%$
ПВ–60	Статор	110,0/0,94	130/1,14	146,0/1,28	197/1,73	140/1,23	145/1,27	181/1,59	221/1,94
	Ротор	118/0,95	121/0,97	136/1,11	158,1/1,11	147/1,29	150/1,32	167/1,47	194/1,70
ПВ–40	Статор	115,0/1,01	150/1,32	152,1/1,10	126/ 1,11	182/1,60	188/1,65	229/2,01	271/2,38
	Ротор	123/1,08	125/1,10	139/ 1,22	161,3/1,14	202/1,77	208/1,82	221/1,94	248/2,18
ПВ–25	Статор	123,0/1,08	134/1,18	156,0/1,09	186/1,63	224/1,96	230/2,02	271/2,38	310/2,72
	Ротор	142/1,25	144/1,26	153/1,34	174,2/1,21	266/2,33	269/2,36	286/2,51	308/2,7

В качестве примера на рисунке 5 показаны графики средней температура лобовой части наиболее нагруженной фазы статора АД МТН 111-6 в режиме S3 ($t_u = 10$ мин) при ПВ = 60% (а) и ПВ = 25% (б)

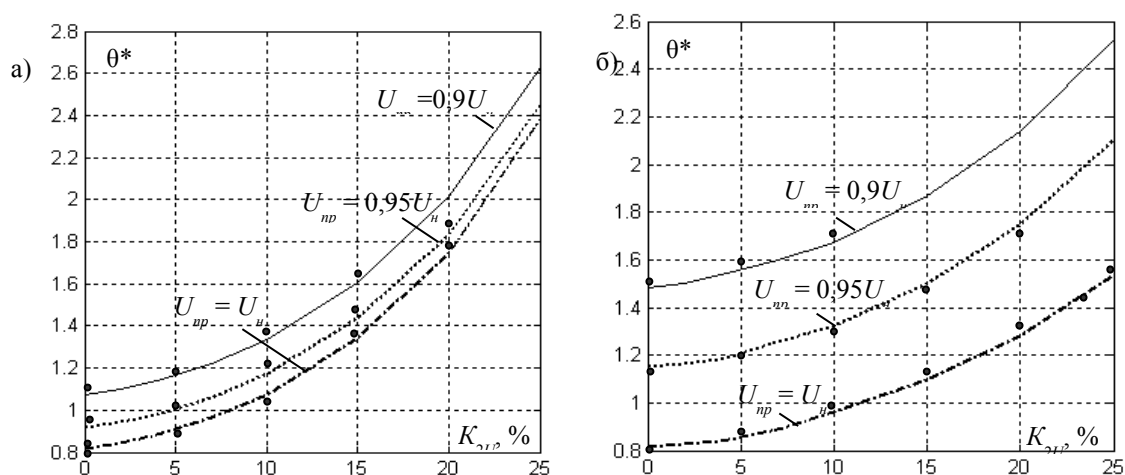


Рисунок 5 – Средняя температура лобовой части наиболее нагруженной фазы статора АД МТН 111-6 в режиме S3 () при ПВ=60% (а) и ПВ = 25% (б) в функции K_{2U} при различных значениях U_{np}

при различных значениях U_{np} и K_{2U} .

При снижении напряжения прямой последовательности темпы роста потерь растут при увеличении нагрузки на валу электродвигателя. В результате чего (рисунок 5), при снижении U_{np} ниже U_n более интенсивный рост токов имеет место при снижении продолжительности включения. Например, в двигателе МТН 111-6 при $K_{2U}=0\%$ и снижении напряжения прямой последовательности на 10% средняя температура наиболее нагруженной фазы статора в режиме S3 при ПВ=25% растет на 72%, при ПВ=60% – на 31 % (в режиме S1 темпы роста не превышают 25%). При нарушении симметрии сети и снижении U_{np} темпы роста температур еще выше. Например, при $U_{np}=0,9U_{np}$ и $K_{2U}=10\%$ рост температуры лобовой части наиболее нагруженной фазы статора составил 59%, 101%, 138% соответственно для ПВ=60%; 40%; 25%.

Кроме аналитических расчётов, проведены тепловые испытания на нагревание двигателя с фазным ротором. Значения перегрева, полученные экспериментально, отмечены точками на рисунке 5. Сравнение экспериментальных и расчетных значений температур АД МТН 111-6 показывает, что расхождение не превышает 5...7%, что находится в пределах точности измерительных приборов.

В работе была выполнена оценка влияния характеристик несимметрии на тепловое состояние АД различного типоразмера. Для этих целей был использован общепринятый подход [4], согласно которому определяющим фактором, влияющим на токи прямой последовательности, является параметр схемы замещения X_0^* , а на токи обратной последовательности – индуктивное сопротивление короткого замыкания X_k^* [4]. Так, для общепромышленных АД мощностью до 400 кВт относительные значения изменяются в пределах $X_k^* = 0,15...0,25$, а $X_0^* = 2...4$ [4].

В качестве примера в таблице 5 представлены значения температур наиболее нагретого узла АД (лобовые часть обмотки ротора θ_6) в повторно–кратковременном режиме S3 при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$, $K_{2U} = 2\%$, $U_{np} = 0,95U_n$ и различных относительных значениях X_k^* и X_0^* . За базовую величину принята температура узла при номинальном входном напряжении.

Таблица 5 – Средние температуры лобовой части обмотки ротора в режиме S3 при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$, $K_{2U} = 2\%$, $U_{np} = 0,95U_n$ и различных значениях X_k^* и X_0^*

X_0^*	$X_k^* = 0,15$			$X_k^* = 0,2$			$X_k^* = 0,25$		
	ПВ–60	ПВ–40	ПВ–25	ПВ–60	ПВ–40	ПВ–25	ПВ–60	ПВ–40	ПВ–25
4	1,16	1,16	1,17	1,15	1,15	1,16	1,10	1,12	1,13
3	1,15	1,16	1,17	1,13	1,14	1,15	1,10	1,11	1,12
2	1,14	1,15	1,16	1,12	1,13	1,14	1,09	1,10	1,11

По известному значению температуры наиболее нагруженного узла можно определить срок службы АД. Срок службы изоляции D при температуре θ и известных сроке службы D_n и допустимой номинальной температуре θ_n равен [3]:

$$D = D_n \cdot \exp\left(-\frac{\theta - \theta_n}{\Delta\theta}\right). \quad (3)$$

Здесь величина $\Delta\theta$ принимается постоянной для данного класса изоляции [3]. Расчетные значения относительного срока службы АД при $K_{2U} = 2\%$ и $U_{np} = 0,95U_n$ и $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$ представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Относительный срок службы изоляционных материалов в режиме S3 при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$, $K_{2U} = 2\%$ и $U_{np} = 0,95U_n$ и различных значениях X_k^* и X_0^*

X_0^*	$X_k^* = 0,15$			$X_k^* = 0,2$			$X_k^* = 0,25$		
	ПВ–60	ПВ–40	ПВ–25	ПВ–60	ПВ–40	ПВ–25	ПВ–60	ПВ–40	ПВ–25
4	0,27	0,26	0,25	0,59	0,43	0,31	0,79	0,68	0,60
3	0,33	0,30	0,28	0,60	0,46	0,33	0,81	0,71	0,65
2	0,57	0,42	0,30	0,63	0,49	0,36	0,85	0,75	0,69

Результаты проведенных исследований показывают, что с ростом X_0^* и при снижении X_k^* происходит уменьшение относительного срока службы изоляционных материалов. Из данных, представленных в таблице 5 следует, что в режиме S3 при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$, $K_{2U} = 2\%$ и $U_{np} = 0,95U_n$ тепловые перегрузки асинхронных электродвигателей могут достигать 10...16% (так же, как и в режиме S1). В результате (таблица 6) срок эксплуатации АД может снизиться на 15...75% (в режиме S1 снижение срока службы составляет 40...60%). В ходе проведенных исследований было установлено, что тепловые перегрузки общепромышленных АД мощностью 1÷400 кВт при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$, $K_{2U} = 2\%$ и $0,98U_n \leq U_{np} \leq 1,05U_n$ не превышают 4...7%. В связи с этим может быть рекомендовано скорректировать длительно допустимое ГОСТ 13109-97 значение отклонения напряжения $2\% \leq \delta U \leq 5\%$.

Таблица 7 – Нагрузка на валу АД в режиме S3 при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$ и различных значениях U_{np} , K_{2U}

U_{np}	X_0^*	$K_{2U} = 2\%$		$K_{2U} = 4\%$		$K_{2U} = 10\%$	
		$X_k^* = 0,15$	$X_k^* = 0,25$	$X_k^* = 0,15$	$X_k^* = 0,25$	$X_k^* = 0,15$	$X_k^* = 0,25$
1,0	$X_0^* = 2 \div 4$	0,96	0,99	0,96	0,98	0,89	0,93
0,95	$X_0^* = 2$	0,95	0,98	0,95	0,98	0,89	0,93
	$X_0^* = 4$	0,92	0,93	0,90	0,92	0,88	0,92
0,9	$X_0^* = 2$	0,94	0,99	0,94	0,98	0,89	0,93
	$X_0^* = 4$	0,87	0,86	0,83	0,85	0,75	0,82

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что при несимметрии входного напряжения во избежание выхода двигателя из строя необходимо снижать нагрузку на его валу. По результатам расчётов выявлено (таблица 7), как должна изменяться нагрузка в режиме S3 при несимметрии напряжения, чтобы температура наиболее нагруженного узла АД не превышала допустимое значение.

Результаты анализа влияния параметров схемы замещения X_0^* и X_k^* на температурное поле АД позволяют обобщить полученные в статье выводы о тепловом состоянии АД в повторно-кратковременном режиме на достаточно широкий класс двигателей, у которых $X_0^* = 2...4$ и $X_k^* = 0,15...0,25$.

Выводы. Результаты исследований позволили оценить влияние несимметрии питающего напряжения на тепловое состояние и срок службы АД в повторно-кратковременном режиме S3 для широкого класса двигателей. В результате чего можно указать следующее:

- установлено, что относительное значение тока обратной последовательности снижается при увеличении ПВ;
- показано, что при ассиметрии питающего напряжения происходит рост температур всех узлов АД, однако, наибольшие тепловые нагрузки испытывает лобовая часть наиболее нагруженной фазы статора;
- выявлен более интенсивный рост температуры при несимметрии источника питания в продолжительном режиме S1 по сравнению с эксплуатацией в повторно-кратковременном режиме S3 при одинаковых средних нагрузках и постоянном значении напряжения прямой последовательности, что связано со снижением относительное значение тока обратной последовательности при увеличении ПВ;
- исследования, выполненные для наиболее неблагоприятного значения фазового сдвига показали, что при допустимых ГОСТ 13109-97 значениях показателей качества электрической энергии δU и K_{2U} ($K_{2U} \leq 2\%$, $|\delta U| \leq 5\%$) тепловые перегрузки могут достигать 10...17%, в результате сокращение срока безаварийной эксплуатации может составить до 20...80%;
- установлено, что тепловые перегрузки общепромышленных АД мощностью 1÷400 кВт при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$, $K_{2U} = 2\%$ и $U_{np} = 0,98U_n$ не превышают 5%. В связи с этим предложено скорректировать длительно допустимое ГОСТ 13109-97 значение отклонения напряжения $2\% \leq \delta U \leq 5\%$;
- определены необходимые величины снижения нагрузок, позволяющие сохранить ресурс изоляционных материалов при различных видах несимметрии напряжения сети.

Задачей дальнейших исследований может быть экспериментальное подтверждение полученных результатов, а также исследование АД в других режимах.

Библиографический список

1. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введен в Украине с 01.01.2000.
2. Федоров М.М. Особенности теплового состояния асинхронных двигателей при несимметричном питающем напряжении / М.М. Федоров, О.Г. Пинчук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного ун-ту. — Кременчук, 2004. — Вип. 2 (25). — С. 122–125.
3. Федоров М.М. Исследование распределения температур узлов асинхронного двигателя при несимметрии питающих напряжений / М.М. Федоров, В.Ф. Денник, А.В. Корощенко // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. Электротехника и энергетика. — Донецк, 1999. — Вып. 4. — С. 138–141.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский. — М: Энергия, 1980. — 928 с.

Поступила в редакцию 5.12.2007 г.