

## ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ ПРИ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ

Шелехова О. Г.

Отказ асинхронного двигателя (АД) вследствие нарушения симметрии питающего напряжения приводит к материальному ущербу, связанному с необходимостью его замены, а затраты от нарушения технологического процесса могут многократно превышать его стоимость. Наибольшая доля отказов АД связана с перегревом его обмоток. Прогнозирование теплового состояния АД позволяет исключить их тепловую перегрузку в тяжелых режимах, одним из которых является повторно-кратковременный режим с электрическим торможением *S5*. Результаты исследований позволили оценить влияние параметров несимметрии питающего напряжения на тепловое состояние АД в повторно-кратковременном режиме с электрическим торможением *S5* для широкого класса двигателей.

Відмова асинхронного двигуна (АД) внаслідок порушення симетрії напруги живлення призводить до матеріального збитку, пов'язаного із необхідністю його заміни, а витрати від порушення технологічного процесу можуть багаторазово перевищувати його вартість. Найбільша частка відмов АД пов'язана з перегрівом його обмоток. Прогнозування теплового стану АД дозволяє виключити їх теплове перевантаження у важких режимах, одним з яких є повторно-короткочасний режим з електричним гальмуванням *S5*. Результати досліджень дозволили оцінити вплив параметрів несиметрії напруги живлення на тепловий стан АД у повторно-короткочасному режимі з електричним гальмуванням *S5* для широкого класу двигунів.

The refusal of the asynchronous motor (AM) due to the symmetry breaking of the supply voltage causes material losses associated with the need for its replacement, and costs from disrupting the production process can exceed its cost. The largest share of failures AM associated with overheating of windings. Prediction of the thermal state of AM allows you to exclude thermal overload heavy-duty, one of which is intermittent mode with electric braking. The results allowed us to evaluate the influence of the supply voltage asymmetry on the thermal condition AM in intermittent duty with electric braking *S5* for a wide class of engines.

Шелехова О. Г.

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ДонНТУ»

[jenjaistorik@mail.ru](mailto:jenjaistorik@mail.ru)

ДВНЗ «ДонНТУ» – Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»; м. Донецьк.

УДК 621.313.333.018

Шелехова О. Г.

### ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПОВТОРНО–КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ ПРИ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ

Отказ асинхронного двигателя (АД) вследствие нарушения симметрии питающего напряжения приводит к материальному ущербу, связанному с необходимостью его замены, а затраты от нарушения технологического процесса могут многократно превышать его стоимость [1]. Наибольшая доля отказов АД связана с перегревом его обмоток [2]. Прогнозирование теплового состояния позволяет исключить их тепловую перегрузку в тяжелых режимах, одним из которых является повторно-кратковременный режим с электрическим торможением (S5 по ГОСТ 183-74) [3].

Влияние несимметрии питающего напряжения на температурное поле АД рассмотрено в работах [4–7]. Однако оценка влияния параметров несимметрии напряжения сети на тепловое состояние электродвигателя повторно-кратковременном режиме с электрическим торможением S5 требует дополнительного исследования.

Целью данной работы была оценка теплового состояния АД в повторно-кратковременном режиме с электрическим торможением S5 при различных параметрах несимметрии питающего напряжения ( $U_{np}$ ,  $K_{2U}$ ,  $\Delta\psi$ ).

Согласно ГОСТ 183-74, в повторно-кратковременном режиме с электрическим торможением S5 цикл работы ( $t_u$ ) равен сумме периода пуска ( $t_n$ ), рабочего периода ( $t_p$ ), торможения ( $t_m$ ) и паузы ( $t_{n3}$ ) [3]. Повторно-кратковременный режим характеризуется продолжительностью включения

$PВ = \frac{t_n + t_p + t_m}{t_u} \cdot 100\%$  [3]. Согласно [3] продолжительность включений

(ПВ): 15, 25, 40 и 60 %; а число включений в час 30, 60, 120 и 240. Величина коэффициента нагрузки на рабочем интервале цикла в режиме S5 подбирается из условия равенства сроку службы в продолжительном режиме [4]. При этом нагрузка на валу электродвигателя ( $\beta$ ) в режиме S5 в зависимости от ПВ и  $t_u$  варьируется в широких пределах [4]. Поэтому значительный интерес при оценке эксплуатационных характеристик АД в рассматриваемом режиме представляет оценка потерь в элементах конструкции АД при различных нагрузках на валу АД и различных параметрах несимметрии питающего напряжения.

В результате действия многократных периодически повторяющихся нагрузок в электрической машине имеет место квазиустановившееся состояние [4]. При достижении квазиустановившегося состояния двигатель испытывает наибольшие тепловые перегрузки [4], поэтому с точки зрения надежности оно представляет значительный практический интерес. Для анализа теплового состояния АД в повторно-кратковременном режиме с электрическим торможением S5 необходимо вычислить максимальное ( $\theta_{max}$ ), минимальное ( $\theta_{min}$ ) и среднее ( $\theta_{cp}$ ) 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) [4]. Для этого использовалась ЭТС, разработанная проф. Федоровым М. М., которая позволяет учесть неравномерный нагрев электродвигателя при различных характеристиках несимметрии источника питания [4]. 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. При составлении ЭТС асинхронного двигателя с фазным ротором выделяются следующие узлы [7]: 1, 2,

3 – пазовые части обмоток статора (теплоёмкости  $C_1, C_2, C_3$  потери мощности  $P_1, P_2, P_3$ ); 4, 5, 6 – лобовые части обмоток статора (теплоёмкости  $C_4, C_5, C_6$ , потери мощности  $P_4, P_5, P_6$ ); 7 – пакет статора (теплоёмкость  $C_7$ , потери мощности  $P_7$ ); 8 – корпус (теплоёмкость  $C_8$ ); 9 – внутренний воздух (теплоёмкость  $C_9$ ); 10 – пакет (железо) ротора теплоёмкость  $C_{10}$ , потери мощности  $P_{10}$ ); 11 – пазовая часть обмотки ротора (теплоёмкость  $C_{11}$ , потери мощности  $P_{11}$ ); 12 – лобовая часть обмотки ротора (теплоёмкость  $C_{12}$ , потери мощности  $P_{12}$ ). Система дифференциальных уравнений в матричном виде, полученная с помощью ЭТС, описывающих тепловые процессы при нагреве и охлаждении в узлах АД, имеет вид [4]:

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

где  $(\theta_1, \dots, \theta_{12})^T$  – вектор-столбец превышения температур соответствующих узлов над температурой окружающей среды  $\theta_0$ ;  $C$  – диагональная матрица теплоемкостей узлов двигателей;  $\Lambda = (\lambda_{ij})$  – матрица теплопроводностей ЭТС АД;  $P = (P_1, \dots, P_{12})^T$ . Особенностью расчета является учет периода пуска [4]. При расчете теплового состояния АД с самовентиляцией следует учитывать, что на интервалах пуска и торможения теплопроводность  $\lambda_n$  зависит от частоты вращения  $\omega$  [4]. Обычно можно считать [4]:  $\lambda_n = \frac{\lambda_n + \lambda_{ox}}{2}$ . При пуске  $P_{ном}$  элементы вектора потерь равны  $P = P_n$ , при работе под нагрузкой –  $P = P_{ном}$ , при торможении –  $P = P_m$ , а в режиме охлаждения  $P = 0$  [4].

Динамические характеристики АД при пуске ( $P_n$  и  $t_n$ ) и торможении ( $P_m$  и  $t_m$ ) зависят от системы управления двигателями электроприводов и от параметров питающего напряжения [4]. Ток при пуске и торможении является функцией времени  $I(t)$  [4], однако, при расчете динамики тепловых процессов с помощью ЭТС на интервалах пуска и торможения с достаточной степенью точности можно считать величину тока постоянной и равной соответствующему действующему значению  $I_n$  и  $I_m$  [4].

При решении системы (1) следует учитывать, что ток статора в повторно-кратковременных режимах выше, чем в продолжительном [1]. Величины коэффициентов нагрузки при симметричном напряжении сети на рабочем интервале цикла, соответствующие номинальным режимам  $S5$  при различных ПВ, подбирались из условия, что срок службы АД равен номинальному  $D^* = 1$ . Подобный подход обеспечивает равенство срока службы изоляции обмоток в режимах  $S1$  и  $S5$  при различных ПВ.

Для расчета потерь АД при пуске, торможении и в установившемся режиме был использован метод симметричных составляющих [8]. С помощью математической модели [9], выполненной в естественных фазных координатах статора и ротора, были исследованы статические и динамические характеристики АД типа МТН 111-6 при различных параметрах несимметрии питающего напряжения.

Токи в фазах первичной обмотки распределены неравномерно вследствие искажения симметрии питающего напряжения. Результирующие токи в обмотках статора в значительной степени зависят от величины сдвига по фазе между напряжениями прямой и обратной последовательностей  $\Delta\psi$  [7], что связано с соответствующим изменением угла между векторами симметричных составляющих токов. Поэтому анализ осуществлялся для наиболее неблагоприятного значения фазового сдвига  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$  [7], который имеет место при одинаковых направлениях симметричных составляющих токов одной из фаз [7].

В качестве примера в табл. 1, 2 приведен ток наиболее нагруженной фазной обмотки статора и ток ротора в режиме  $S5$  (ПВ-40,  $t_u = 1$  мин) при пуске ( $I_{1n}, I_{2n}$ ), торможении ( $I_{1m}, I_{2m}$ ) и на рабочем участке ( $I_{1p}, I_{2p}$ ) и их симметричные составляющие при различных значениях  $K_{2U}$  при  $U_{np} = U_n$ ,  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ . В качестве базовых приняты величины токов в соответствующих режимах при симметричном напряжении сети.

Токи статора и ротора при пуске ( $I_{1n}, I_{2n}$ ), их симметричные составляющие ( $I_{1npn}, I_{1обpn}, I_{2npn}, I_{2обpn}$ ) АД МТН 111-6 в режиме S5 (ПВ-40,  $t_u = 1$  мин) при  $U_{np} = U_n$  и различных  $K_{2U}$

$K_{2U},$ %	$I_{1npn},$ А	$\frac{I_{1npn}}{I_{1nn}}$	$I_{1обpn},$ А	$\frac{I_{1обpn}}{I_{1nn}}$	$I_{1n},$ А	$\frac{I_{1n}}{I_{1nn}}$	$I_{2npn},$ А	$\frac{I_{2npn}}{I_{2nn}}$	$I_{2обpn},$ А	$\frac{I_{2обpn}}{I_{2nn}}$	$I_{2n},$ А	$\frac{I_2}{I_{2n}}$	$\frac{t_n}{t_{nn}}$
0	33.6	1.00	0	0	33.6	1.00	30.4	1.00	0	0	30.4	1.00	1.00
5	33.6	1.00	2.1	0.05	35.4	1.05	30.4	1.00	4.4	0.13	30.6	1.01	1.04
10	33.6	1.00	4.3	0.13	37.9	1.13	30.4	1.00	9.0	0.30	31.5	1.04	1.07
15	33.6	1.00	6.4	0.19	40.0	1.19	30.4	1.00	13.4	0.44	33.6	1.11	1.11

Таблица 2

Токи статора и ротора на рабочем участке ( $I_{1p}, I_{2p}$ ) и их симметричные составляющие ( $I_{1npp}, I_{1обpp}, I_{2npp}, I_{2обpp}$ ) АДМТН111-6 в режиме S5 (ПВ-40,  $t_u = 1$  мин) при  $U_{np} = U_n$  и различных  $K_{2U}$

$K_{2U},$ %	$I_{1npp},$ А	$\frac{I_{1npp}}{I_{1pn}}$	$I_{1обpp},$ А	$\frac{I_{1обpp}}{I_{1pn}}$	$I_{1p},$ А	$\frac{I_{1p}}{I_{1pn}}$	$I_{2npp},$ А	$\frac{I_{2npp}}{I_{2pn}}$	$I_{2обpp},$ А	$\frac{I_{2обpp}}{I_{2pn}}$	$I_{2p},$ А	$\frac{I_2}{I_{2pn}}$
0	19.5	1.00	0	0	19.5	1.00	15.6	1.00	0	0	15.6	1.00
5	19.5	1.00	2.1	0.11	21.6	1.16	15.6	1.00	4.4	0.28	16.4	1.05
10	19.5	1.00	4.3	0.22	23.8	1.42	15.6	1.00	9.0	0.58	18.1	1.15
15	19.5	1.00	6.4	0.33	25.9	1.58	15.6	1.00	13.4	0.86	20.6	1.32

Таблица 3

Токи статора и ротора при пуске ( $I_{1m}, I_{2m}$ ), их симметричные составляющие ( $I_{1npt}, I_{1обpt}, I_{2npt}, I_{2обpt}$ ) АД МТН 111-6 в режиме S5 (ПВ-40,  $t_u = 1$  мин) при  $U_{np} = U_n$  и различных  $K_{2U}$

$K_{2U},$ %	$I_{1npt},$ А	$\frac{I_{1npt}}{I_{1mt}}$	$I_{1обpt},$ А	$\frac{I_{1обpt}}{I_{1mt}}$	$I_{1m},$ А	$\frac{I_{1m}}{I_{1mt}}$	$I_{2npt},$ А	$\frac{I_{2npt}}{I_{2mt}}$	$I_{2обpt},$ А	$\frac{I_{2обpt}}{I_{2mt}}$	$I_{2m},$ А	$\frac{I_2}{I_{2mt}}$	$\frac{t_m}{t_{mt}}$
0	54.8	1.00	0	0	0	1.00	47.1	1.00	0	0	47.1	1.00	1.00
5	54.8	1.00	2.1	0.04	56.6	1.03	47.1	1.00	4.4	0.09	47.3	1.00	1.05
10	54.8	1.00	4.3	0.08	59.2	1.08	47.1	1.00	9.0	0.19	47.9	1.02	1.08
15	54.8	1.00	6.4	0.12	61.2	1.12	47.1	1.00	13.4	0.29	49.0	1.04	1.12

Из анализа результатов, представленных в табл. 1 – 3 следует, что рост несимметрии питающего напряжения при  $U_{np} = U_n$  не влияет на величины токов прямой последовательности статора и ротора при пуске ( $I_{1npn}, I_{2npn}$ ), торможении ( $I_{1npt}, I_{2npt}$ ) и на рабочем участке ( $I_{1npp}, I_{2npp}$ ). Тогда их относительные значения при  $U_{np} = U_n$ :

$$I_{1npn}^* = I_{1npp}^* = I_{1npt}^* = I_{2npn}^* = I_{2npp}^* = I_{2npt}^* = 1 \quad (2)$$

Выражение (2) справедливо при  $U_{np} = U_n$  и  $K_{2U} < 15\%$ . При дальнейшем росте несимметрии токи прямой последовательности также растут.

При  $U_{np} = U_n$  и заданном уровне  $K_{2U}$  симметричные составляющие токов обратной последовательности сохраняют постоянное абсолютное значение при пуске, торможении и на рабочем участке: Например (табл. 1 – 3) при  $K_{2U} = 10\%$  и  $U_{np} = U_n$   $I_{1обpn} = I_{1обpt} = I_{1обpp} = 4.3$  А. То есть, при  $U_{np} = U_n$  и заданном уровне  $K_{2U}$  симметричные составляющие

токов обратной последовательности сохраняют постоянное абсолютное значение при пуске, торможении и на рабочем участке: То есть:

$$I_{1обрn} = I_{1обрm} = I_{1обрp}, I_{2обрn} = I_{2обрm} = I_{2обрp}. \quad (3)$$

Далее коротко для простоты изложения –  $I_{1обр}$ ,  $I_{2обр}$ . При этом относительные значения токов обратной последовательности на рабочем участке выше, чем при пуске, торможении. Например (табл. 1 – 3), при  $K_{2U} = 10\%$   $I_{1обр} = 4.3$  А, а относительные значения при пуске, торможении и на рабочем участке  $I_{1обрn}^* = 0.13$ ,  $I_{1обрm}^* = 0.08$ ,  $I_{1обрp}^* = 0.22$ , соответственно. В результате темпы роста токов на рабочем участке в 2 – 3 раза выше, чем при пуске и торможении. Например, при  $K_{2U} = 5\%$  ток наиболее нагруженной фазной обмотки статора на рабочем участке вырос на 11% (рост тока при пуске и торможении не превышает 5% и 3% соответственно). При  $K_{2U} = 15\%$  ток наиболее нагруженной фазы статора в установленном режиме вырос на 33% (рост тока при пуске и торможении не превышает 19% и 12%).

Из анализа результатов, представленных в табл. 1 – 3 следует, что темпы роста токов обратной последовательности в обмотках ротора выше, чем в обмотках статора, однако более интенсивный рост результирующих токов наблюдается в обмотках статора. Например (табл. 1 – 3), при  $K_{2U} = 10\%$  симметричные составляющие токов в обмотках статора и ротора составляют 4.3 А и 9 А соответственно. Однако темпы роста результирующего тока наиболее нагруженной фазы статора и ротора при  $K_{2U} = 10\%$  составили соответственно 13% и 4% при пуске, 41% и 15% – на рабочем участке, 8% и 2% – при торможении.

В ходе проведенных исследований установлено, что составляющие токов обратной последовательности не зависят от величины напряжения прямой последовательности, а определяются только уровнем  $K_{2U}$ .

Снижение напряжения прямой последовательности сопровождается ростом длительности пуска [6], торможения, ростом токов на рабочем участке [6] и снижением токов при пуске [6] и торможении. Например (рис. 1б), при  $K_{2U} = 15\%$  и  $U_{np} = U_n$  ток наиболее нагруженной фазы статора при пуске, торможении и на рабочем участке составили  $1.18I_{1nn}$ ,  $1.08I_{1nn}$ ,  $1.41I_{1pn}$  соответственно, при  $U_{np} = 0.8U_n$  токи при пуске и торможении составили  $0.95I_{1nn}$  и  $0.85I_{1nn}$ , на рабочем участке –  $1.61I_{1pn}$  и т. д.

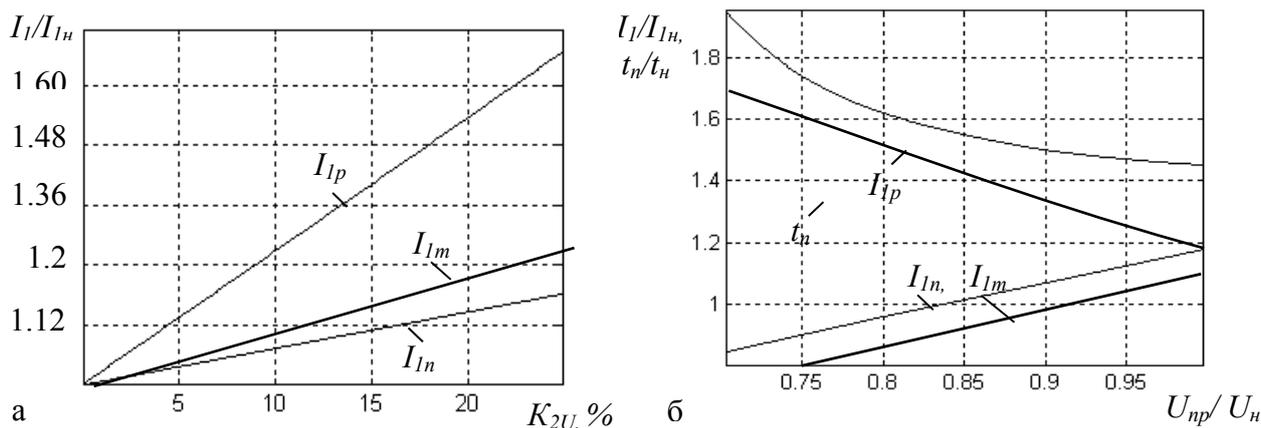


Рис. 1. Ток наиболее нагруженной фазы статора при пуске ( $I_{1n}$ ), торможении ( $I_{1n}$ ) и на рабочем участке ( $I_{1p}$ ), при  $U_{np} = U_n$  и различных  $K_{2U}$  (рис. 1, а) и при  $K_{2U} = 15\%$  и различных значениях  $U_{np}$  (рис. 1, б).

Величина коэффициента нагрузки ( $\beta$ ) на валу АДв режиме S5 в зависимости от ПВ и  $t_u$  варьируется в широких пределах [4]. Как было показано в работе [5, 6] в диапазоне значений  $\beta = 0.5 \div 2.0$  величина тока обратной последовательности не зависит от нагрузки на валу АД, поэтому абсолютное значение тока обратной последовательности остается

постоянным при любой продолжительности включения. Большим ПВ и  $t_{\text{ц}}$  соответствует меньшая нагрузка на валу АД. Тогда относительное значение тока обратной последовательности уменьшается при снижении ПВ и  $t_{\text{ц}}$ . В результате, большие темпы роста токов в обмотках электродвигателя при несимметрии сети наблюдаются при увеличении ПВ [5, 6] и с ростом  $t_{\text{ц}}$ .

В режиме  $S5$  (как и в режиме  $S4$  [5, 6]) при симметричном питающем напряжении наиболее нагретым узлом является обмотка ротора, что можно объяснить худшими условиями теплоотвода в роторе [4]. С ростом  $K_{2U}$  (по аналогии с  $S4$  [5, 6]), наибольшие тепловые нагрузки испытывает лобовая часть наиболее нагруженной фазы статора. Размах колебаний температуры квазиустановившегося состояния в режиме  $S5$  при симметричном напряжении сети не превышает  $25^{\circ}\text{C}$ , поэтому в качестве критерия, ресурса изоляционных материалов, может быть принято среднее значение температуры в цикле [4].

Проведен анализ теплового состояния АД при различных значениях  $K_{2U}$ ,  $U_{\text{нр}}$  и ПВ. В качестве базового было принято превышение температуры лобовой части обмотки статора в режиме  $S1$  при номинальных значениях напряжения и нагрузки.

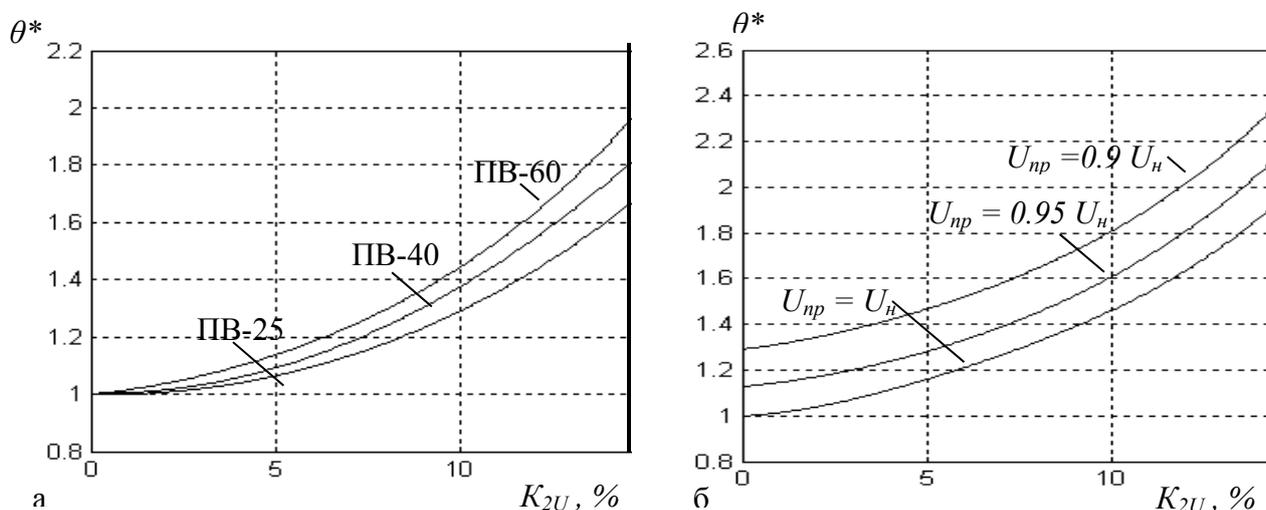


Рис. 2. Средняя температура лобовой части наиболее нагруженной фазной обмотки статора АД МТН-111-6 в режиме  $S5$  ( $t_{\text{ц}} = 1$  мин) при различных ПВ и  $K_{2U}$  (а), в режиме  $S5$  ( $t_{\text{ц}} = 1$  мин, ПВ = 40 %) при различных  $U_{\text{нр}}$  и  $K_{2U}$  (б)

Из анализа результатов, представленных на рис. 2, а следует, что, также как и в режимах  $S3$ ,  $S4$  более интенсивный рост температур при асимметрии наблюдается при увеличении ПВ. В случае, когда несимметрии питающего напряжения сопровождается снижением  $U_{\text{нр}}$ , темпы роста температур возрастают (рис. 2, б). Как и в режимах  $S3$ ,  $S4$  [5, 6] снижение  $U_{\text{нр}}$  ниже  $U_{\text{н}}$  сопровождается более интенсивным ростом температур при снижении ПВ, что связано с особенностями распределения потерь при различных нагрузках и несимметричном напряжении сети [5, 6].

Сравнительный анализ теплового состояния АД при ПВ = 40 % в режимах  $S1$ ,  $S3$ ,  $S4$ ,  $S5$  при различных параметрах несимметрии сети (табл. 4). Во всех рассматриваемых режимах срок службы изоляции обмоток был одинаковым при симметричном напряжении сети и равен сроку службы электродвигателя в продолжительном режиме работы.

Сравнительный анализ режимов  $S1$ ,  $S3$ ,  $S4$ ,  $S5$  показывает, что при  $U_{\text{нр}} = U_{\text{н}}$  (табл. 4) наибольшие темпы роста температур имеют место в продолжительном режиме работы. При снижении напряжения прямой последовательности (табл. 4) более интенсивный рост температур в повторно-кратковременном режиме  $S5$ .

Таблица 4

Превышения температуры лобовой части наиболее нагруженной фазной обмотки статора АД МТН-111-6 в различных режимах при различных  $t_{\psi}$ ,  $K_{2U}$ ,  $U_{np}$

$K_{2U}$ , %	$U_{np}$	S1	S3 ( $t_{\psi} = 10$ мин, ПВ = 40 %)			S4 ( $t_{\psi} = 1$ мин, ПВ = 40 %)		S5 ( $t_{\psi} = 1$ мин, ПВ = 40 %)		
		$\theta/\theta^*$	$\theta/\theta^*$	$t_n^*$ , %	$\theta/\theta^*$	$t_n^*$ , %	$\theta/\theta^*$	$t_n^*$ , %	$t_m^*$ , %	
0	$U_H$	110.0/1.00	92.1/1.00	0.66	110.0/1.00	1.32	110.0/1.00	1.35	1.36	
	$0.9U_H$	140.8/1.28	156.3/1.42	0.80	161.3/1.47	1.60	159.1/1.45	1.65	1.67	
10	$U_H$	170.5/1.55	138.2/1.50	0.71	158.0/1.44	1.41	156.2/1.42	1.46	1.48	
	$0.9U_H$	206.8/1.88	184.2/2.00	0.86	222.7/2.02	1.71	214.5/2.15	1.77	1.79	

Таблица 5

Превышения температуры лобовой части наиболее нагруженной фазной обмотки статора АД МТН-111-6 в режиме S5 (ПВ=40%) при различных  $t_{\psi}$ ,  $K_{2U}$ ,  $U_{np}$

$K_{2U}$ , %	$U_{np}$	S5 ( $t_{\psi} = 2$ мин, ПВ = 40 %)			S5 ( $t_{\psi} = 1$ мин, ПВ = 40 %)			S5 ( $t_{\psi} = 0.5$ мин, ПВ = 40 %)		
		$\theta/\theta^*$	$t_n^*$ , %	$t_m^*$ , %	$\theta/\theta^*$	$t_n^*$ , %	$t_m^*$ , %	$\theta/\theta^*$	$t_n^*$ , %	$t_m^*$ , %
0	$U_H$	110.1/1.00	0.67	0.68	110.0/1.00	1.35	1.36	110.0/1.00	2.64	2.74
	$0.9U_H$	132.6/1.21	0.81	0.83	159.1/1.45	1.65	1.67	183.3/1.67	3.20	3.31
10	$U_H$	164.1/1.49	0.72	0.74	156.2/1.42	1.46	1.48	151.8/1.38	2.83	2.94
	$0.9U_H$	43179.9/1.64	0.88	0.89	214,5/1.95	1.77	1.80	266.8/2.	3.42	3.55

При снижении  $U_{np}$  снижаются действующие значения токов при пуске и торможении (табл. 1, 3), и, одновременно, растет длительность пуска и торможения. В результате потери при пуске и торможения при снижении напряжения прямой последовательности практически не изменяются, а определяющим фактором, влияющим на температуру АД, является потери на рабочем интервале цикла. На основании проведенных исследований, установлено, что чем выше нагрузка на валу АД, тем более интенсивный рост потерь на рабочем участке сопровождается снижением  $U_{np}$  [10]. В результате более интенсивный рост температур при снижении  $U_{np}$  наблюдается при снижении  $t_{\psi}$ .

Увеличение асимметрии напряжения сети при  $U_{np} = U_H$  сопровождается более интенсивным ростом температуры при увеличении длительности цикла. Например, при  $K_{2U} = 10\%$  и  $U_{np} = U_H$  рост температур составил, 38 %, 42 %, 49 % при  $t_{\psi} = 0.5$  мин,  $t_{\psi} = 1$  мин,  $t_{\psi} = 2$  мин соответственно.

Несимметрия питающего напряжения при снижении напряжения прямой последовательности  $U_{np}$  сопровождается более интенсивным ростом среднего значения температуры  $\theta_{cp}$  цикла квазиустановившегося состояния температур при увеличении длительности цикла.

В ходе проведенных исследований установлено, при  $U_{np} = U_H$  чем меньше момент инерции электродвигателя, тем выше темпы роста температур в обмотках АД при несимметрии питающего напряжения. Более интенсивный рост температур при снижении напряжения прямой последовательности имеет место при больших моментах инерции.

В качестве примера в табл. 6 представлены значения температур наиболее нагретого узла АД (пазовая часть обмотки ротора) в повторно-кратковременном режиме S5 при  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ ,  $K_{2U} = 2\%$ ,  $U_{np} = 0.95U_H$  и различных относительных значениях  $X_k^*$  и  $X_0^*$ . В качестве базовой принята температура ротора при номинальном напряжении сети. Расчетные значения относительного срока службы АД при  $K_{2U} = 2\%$  и  $U_{np} = 0.95U_H$  и  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$  представлены в табл. 6.

Результаты проведенных исследований показывают, что с ростом  $X_k^*$  и  $X_0^*$  происходит уменьшение относительного срока службы изоляционных материалов. Из данных, представленных в табл. 6 следует, что в режиме S5 при  $K_{2U} = 2\%$ ,  $U_{np} = 0.95U_H$  и  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$  тепловые

перегрузки асинхронных электродвигателей могут достигать 7–15 % (так же, как и в режиме S1). В результате срок эксплуатации АД может снизиться на 12–65 % (в режиме S1 снижение срока службы составляет 40–60 % [6]). Значительный интерес представляет (табл. 6) определение допустимого коэффициента несимметрии токов обратной последовательности  $K_{2I\text{ доп}}$  в обмотках статора при различных нагрузках на валу АД.

Таблица 6

Средняя температура пазовой части обмоток и ротора в режиме S5 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	1.17	1.16	1.18	1.14	1.14	1.15	1.09	1.11	1.12
3	1.13	1.14	1.17	1.12	1.13	1.14	1.08	1.10	1.11
2	1.12	1.13	1.14	1.10	1.11	1.12	1.07	1.09	1.10

Также, как и в режиме S1 методика расчета  $K_{2I\text{ доп}}$  была следующей. Задаваясь величиной нагрузки на валу АД и различными значениями напряжения обратной последовательности (при  $U_{np} = 0.95U_n$ ) определялись комплексы токов прямой и обратной последовательности согласно Т-образной схемы замещения и рассчитывались результирующие токи в обмотках электродвигателя.

По результатам расчётов выявлено (табл. 7), как должна изменяться нагрузка в режиме S5 при несимметрии напряжения, чтобы температура наиболее нагруженного узла АД не превышала допустимое значение.

Таблица 7

Нагрузка на валу АД в режиме S5 ( $t_u = 1$  мин, ПВ = 40 %) при  $U_{np} = 0.95U_n$ ,

$\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$  и различных значениях  $K_{2I}$

$K_{2I} = 10\%$			$K_{2I} = 20\%$			$K_{2I} = 30\%$		
$X_0^* = 2$	$X_0^* = 3$	$X_0^* = 4$	$X_0^* = 2$	$X_0^* = 3$	$X_0^* = 4$	$X_0^* = 2$	$X_0^* = 3$	$X_0^* = 4$
0.99	0.98	0.94	0.98	0.96	0.94	0.96	0.94	0.93

Результаты анализа влияния параметров схемы замещения  $X_0^*$  и  $X_k^*$  на температурное поле АД позволяют обобщить полученные в работе выводы о тепловом состоянии АД в повторно-кратковременном режиме с электрическим торможением S5 на достаточно широкий класс двигателей, у которых  $X_0^* = 2 \div 4$  и  $X_k^* = 0.15 \div 0.25$ .

Результаты исследований позволили оценить влияние несимметрии питающего напряжения на тепловое состояние и срок службы АД в повторно-кратковременном режиме с электрическим торможением S5 для широкого класса двигателей.

## ВЫВОДЫ

1. Величина тока прямой последовательности при  $U_{np} = U_n$  не зависит от величины коэффициента несимметрии напряжения обратной последовательности (при  $K_{2U} < 15\%$ ) как при пуске, торможении, так и на рабочем участке.

2. При  $U_{np} = U_n$  и заданном уровне  $K_{2U}$  симметричные составляющие токов обратной последовательности статора и ротора сохраняют постоянное абсолютное значение при пуске, торможении и на рабочем участке.

3. Темпы роста токов обратной последовательности в обмотках ротора выше, чем в обмотках статора, однако более интенсивный рост результирующих токов наблюдается в обмотках статора.

4. Значения тока обратной последовательности статора и ротора не зависят от напряжения прямой последовательности.

5. Показано, что при  $U_{np} = U_n$  рост относительных значений токов обратной последовательности статора и ротора при несимметрии питающего напряжения в установившемся режиме в несколько раз выше, чем при пуске, торможении. Выявлены более интенсивный рост длительности торможения по сравнению с режимом пуска.

6. Более интенсивный рост температур в режиме  $S5$  при снижении  $U_{np}$  наблюдается при снижении длительности цикла. Более интенсивный рост температур АД с ростом  $K_{2U}$  имеет место при увеличении длительности цикла.

7. Обосновано, чем выше нагрузка на валу электродвигателя, тем к большему увеличению длительности пуска приводит снижение напряжения прямой последовательности и рост несимметрии напряжения сети.

8. Установлено, при  $U_{np} = U_n$  чем меньше момент инерции электродвигателя, тем выше темпы роста температур в обмотках АД при несимметрии питающего напряжения. Более интенсивный рост температур при снижении напряжения прямой последовательности имеет место при больших моментах инерции.

9. Сравнительный анализ режимов  $S1$ ,  $S3$ ,  $S4$ ,  $S5$  показывает, что при  $U_{np} = U_n$  наибольшие темпы роста температур имеют место в продолжительном режиме работы. При снижении напряжения прямой последовательности выявлен более интенсивный рост температур в повторно-кратковременном режиме  $S5$ .

10. Определены необходимые величины снижения нагрузок, позволяющие сохранить ресурс изоляционных материалов при различных видах несимметрии напряжения сети.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черный А. П. Применение показателей качества преобразования энергии для оценки состояния и надежности электромеханических систем / А. П. Черный, А. П. Калинов, Д. Г. Мамчур // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: IV международн. науч.-техн. конф. Днепропетровск, 2006. – С. 245.
2. Определение допустимого тока статора закрытого асинхронного двигателя в повторно-кратковременных режимах с электрическим торможением / А. Н. Бурковский, Е. Ю. Кустовая, О. А. Рыбалко, Л. К. Шихова // Электротехника и электромеханика, 2007. – № 2. – С. 19–21.
3. ГОСТ 183 – 74. Машины электрические. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ 183 – 66; Введен 01.01.76. – М. : Издательство стандартов. – 1993. – 42 с.
4. 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. Серия «Электротехника и энергетика». – Донецк, 1999. – Вып. 4. – С. 138–141.
5. Пинчук О. Г. Тепловое состояние асинхронных двигателей в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками при несимметрии питающего напряжения / О. Г. Пинчук // Праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і електроенергетика»: зб. наук. праць. – Донецьк, 2004. – Вип. 79. С. 161–163.
6. Пинчук О. Г. Оценка токов и температур асинхронных двигателей при различных характеристиках несимметрии сети: методические подходы / О. Г. Пинчук // Науково-практичний журнал національного технічного університету «ХПІ». Електротехніка і електромеханіка – Харків, 2008. – Вип. 131. – С. 121–130.
7. Пинчук О. Г. Защита от тепловых перегрузок обмоток асинхронных двигателей при несимметрии питающего напряжения / О. Г. Пинчук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». – Донецьк, 2007. – Вип. 7 (128). – С. 193–197.
8. Копылов И. П. Электрические машины / И. П. Копылов – М. : Высшая школа. – 2000. – 607 с.
9. Толочко О. І. Векторні моделі асинхронного двигуна у середовищі пакета Matlab / О. І. Толочко, Г. С. Чекавський, Д. М. Мірошник // Праці Кременчуцького державного політехнічного університету, 2003. – Т. 1. – № 2 (19) – С. 199–202.
10. Федоров М. М. Влияние колебания напряжения сети на электромеханические и тепловые характеристики асинхронных двигателей / М. М. Федоров, Е. Р. Алексеев // Сб. тр. ДонГТУ. Серия «Электротехника и энергетика». – Донецк, 1998. – Вып. 2. – С. 172–177.