

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР УЗЛОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Фёдоров М.М., Денник В.Ф., Корощенко А.В.

Донецкий государственный технический университет

aer@dc.dn.ua

On mathematical model is explored a temperature field of asynchronous motor attached to unsymmetry on phases of feeding his efforts. Shown, that so far as asymmetry of phase currents herewith becomes very essential, then she renders influence on redistribution of temperatures in motor knots and her necessary to take into account. For concrete motor are got quantitative descriptions of his temperature field attached to asymmetry presence of feeding efforts.

Влияние несимметрии питающих напряжений по фазам на распределение температур в конструктивных элементах асинхронного двигателя (АД) исследовано недостаточно, а при отклонении величины питающего напряжения от номинальной и наличии его асимметрии практически не исследовано. Авторы работы считают, что она в определенной мере ликвидирует этот пробел. Согласно ГОСТ 13109-87 асимметрия трехфазной системы напряжений характеризуется коэффициентами обратной K_{2U} (отношение составляющих обратной последовательности к составляющим прямой последовательности) и нулевой K_{0U} (отношение составляющих нулевой последовательности к составляющим прямой последовательности) последовательностей. Однако в АД не применяют нулевой провод и, следовательно, нет токов нулевой последовательности. В связи с этим составляющие нулевой последовательности питающего напряжения не оказывают влияния на режим работы АД и они в данной работе не принимаются во внимание, а рассматривается только влияние составляющих обратной последовательности питающих напряжений на электромеханические и тепловые характеристики АД.

Исследование температур узлов АД произведено на математической модели с применением эквивалентной тепловой схемы (ЭТС) [1] конкретного двигателя. Источники тепловыделения в ЭТС, не могут быть определены без рабочих характеристик АД. В связи с этим авторами разработана ЭВМ-программа расчета электромеханических характеристик двигателя, в основу которой положен метод симметричных составляющих. При расчете электромеханических характеристик АД использована Т-образная схема замещения двигателя. Ее параметры (r_1, x_1, r'_2, x'_2) для токов прямой последовательности могут быть определены по методике, приведенной в [2,3], в которой также учтена нелинейная зависимость параметров намагничивающего контура (r_o, x_o) от величины тока холостого хода двигателя I_o , а потерь в стали - от напряжения намагничивающего контура U_o . Последнее сделано по той причине, что питающее напряжения прямой и обратной последовательностей могут существенно отличаться от номинального.

Поочередно рассчитываются характеристики прямой и обратной последовательностей и по ним формируются результирующие. Расчет ведется в следующей последовательности: в первую очередь рассчитывается пусковой режим, а затем характеристики при различных скольжениях АД. В расчете предусмотрен небольшой итерационный цикл по определению напряжения намагничивающего контура U_o .

При расчете пускового режима задаемся значением напряжения намагничивающего контура U_{0npII} , которое можно принять равным:

$$U_{0npII} = U_{1np} - \beta_{1II} I_{1n} z_1, \quad (1)$$

где: U_{1np} - напряжение прямой последовательности статорной обмотки,

β_{1II} - кратность пускового тока,

I_{1n} - номинальный ток статора,

$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}$ - полное сопротивление статорной обмотки.

Далее, с помощью заранее сформированных зависимостей $U_o(I_o)$ и $p_{cm}(U_o)$ определяется комплексное сопротивление Z_{0npII} намагничивающего контура и уточняется значение U_{0npII} по формулам:

$$\underline{I}_{1npII} = \underline{U}_{1np} / \underline{Z}_{npII}, \quad \underline{U}_{0npII} = \underline{U}_{1np} - \underline{I}_{1npII} Z_1, \quad (2)$$

где:

$$\underline{Z}_{npII} = Z_1 + \underline{Z}_{0npII} Z_2'_{npII} / (Z_{0npII} + Z_2'_{npII}), \quad (3)$$

$$Z_1 = r_1 + jx_1, \quad Z_2'_{npII} = r_2'_{npII} + jx_2'_{npII}.$$

При необходимости цикл повторяется пока последующее значение U_{0npII} от предыдущего будут отличаться не более чем на (1-2)%.

После формирования U_{0npII} , а следовательно, и Z_{0npII} , параметры пускового режима рассчитываются по формулам:

$$\underline{Z}_{rnpII} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{0npII} \underline{Z}'_{2npII} / (\underline{Z}_{0npII} + \underline{Z}'_{2npII}), \quad (4)$$

$$\underline{I}_{1npII} = \underline{U}_{1np} / \underline{Z}_{rnpII}, \quad \underline{U}_{0npII} = \underline{U}_{1np} - \underline{I}_{1npII} \underline{Z}_1, \quad \underline{I}'_{2npII} = \underline{U}_{0npII} / \underline{Z}'_{2npII}. \quad (5)$$

Электромагнитная мощность и момент при пуске соответственно равны:

$$P_{змпнII} = 3 \operatorname{Re}[\underline{U}_{1np} \underline{I}'_{2npII}], \quad M_{нпII} = P_{змпнII} / \omega_1. \quad (6)$$

Подобным образом рассчитывается пусковой режим для обратной последовательности и формируются результирующие характеристики.

Далее задаемся шагом изменения скольжения Δs , так что $s_{i+1} = s_i - \Delta s$ и рассчитываем параметры последующих i -х участков по формулам:

$$\underline{Z}'_{2snp} = r_2 / s + jx_2', \quad \underline{Z}_{1np} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{0i-1np} \underline{Z}'_{2snp} / (\underline{Z}_{0i-1np} + \underline{Z}'_{2snp}), \quad (7)$$

$$\underline{I}_{1np} = \underline{U}_{1np} / \underline{Z}_{1np}, \quad \underline{U}_{0np} = \underline{U}_{1np} - \underline{I}_{1np} \underline{Z}_1, \quad \underline{I}'_{2snp} = \underline{U}_{0np} / \underline{Z}'_{2snp}. \quad (8)$$

По величине U_{0np} определяем I_{0np} , $P_{см}$, формируем Z_{0np} и рассчитываем

$$P_{змпн} = 3 \operatorname{Re}[\underline{U}_{1np} \underline{I}'_{2snp}], \quad M_{1np} = P_{змпн} / \omega_1. \quad (9)$$

Затем производится расчет составляющих обратной последовательности всех величин по формулам, аналогичным (7)–(9), при этом параметры схемы замещения для токов обратной последовательности приняты такими же как и для токов прямой последовательности, однако вместо s взято $2-s$.

Результирующие токи в обмотках статора и ротора определяются по формулам:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{np} + \underline{I}_{обр}, \quad \underline{I}_B = a^2 \underline{I}_{np} + a \underline{I}_{обр}, \quad \underline{I}_C = a \underline{I}_{np} + a^2 \underline{I}_{обр} \quad (10)$$

где: a – фазный множитель, равный $a = \exp(j120^\circ)$.

Результирующий момент двигателя определяется по формуле

$$M = M_{np} - M_{обр}, \quad (11)$$

где M_{np} – момент прямой последовательности,

$M_{обр}$ – момент обратной последовательности.

Коэффициент нагрузки при скольжении s_i соответственно равен

$$\kappa_N = M / M_N. \quad (12)$$

Любые характеристики двигателя, например, $M(s)$ или $I_1(\kappa_N)$ рассчитываются по вышеприведенной методике и по желанию пользователя могут быть выведены либо в виде таблицы, либо в виде графика. Так, например, в табл. 1 приведены значения токов статора (I_1), ротора (I_2), намагничивающего контура (I_0), мощности на валу (P_2), потерь в стали ($P_{см}$), КПД и скольжения s для двигателя 4АМУ 225-4М при номинальной нагрузке ($\kappa_N = M/M_N = 1$), отсутствии асимметрии питающих напряжений ($K_{2U} = 0$) и номинальной величине напряжения питания ($U_{np} = U_N$) – они приняты в качестве базовых, а также при $U_{np} = 0.85 U_N$.

Таблица 1. Электромеханические характеристики двигателя 4АМУ 225-4М

	I_1, A	I_2, A	I_0, A	$P_2, кВт$	$P_{см}, Вт$	КПД	s	Примеч.
$U_{np} = U_N$	101.3	91.3	26.5	55	531.2	0.91	0.0148	Абсол.
$U_{np} = 0.85 U_N$	118.2	110.3	19.4	55	369.8	0.89	0.0224	Абсол.
	1.17	1.21	0.73	1	0.7	0.98	1.51	Относит.

В табл.2 приведены относительные значения величин, необходимых для определения источников тепловыделения в ЭТС - $\beta_{11A} = I_{1A}/I_1$, $\beta_{11B} = I_{1B}/I_1$, $\beta_{11C} = I_{1C}/I_1$, $\beta_{12A} = I_{2A}/I_2$, $\beta_{12B} = I_{2B}/I_2$ и $\beta_{12C} = I_{2C}/I_2$, при номинальной нагрузке ($\kappa_N = 1$) и различных значениях U_{np} и K_{2U} . Расчеты произведены при условии отсутствия сдвига по фазе между U_{np} и $U_{обр}$.

Таблица 2. Относительные значения статорных и роторных токов при наличии несимметрии питающих напряжений

	K_{2U}	β_{11A}	β_{11B}	β_{11C}	β_{12A}	β_{12B}	β_{12C}
$U_{np} = U_n$	0.02	1.05	0.9	1.03	1.03	0.89	1.06
	0.04	1.11	0.8	1.08	1.08	0.8	1.12
	0.06	1.18	0.72	1.13	1.13	0.7	1.2
	0.08	1.25	0.63	1.18	1.19	0.61	1.27
	0.1	1.32	0.54	1.25	1.26	0.51	1.35
$U_{np} = 0.85U_n$	0.02	1.21	1,09	1,2	1,25	1,11	1,23
	0.04	1,26	1,01	1,24	1,29	1,04	1,31
	0.06	1,32	0,93	1,28	1,34	0,96	1,36
	0.08	1,37	0,85	1,33	1,39	0,87	1,42
	0.1	1,43	0,78	1,38	1,44	0,79	1,48

В основу построения ЭТС взята восьмительная эквивалентная схема, но поскольку при наличии асимметрии питающих напряжений статорные и роторные токи становятся резко несимметричными, то

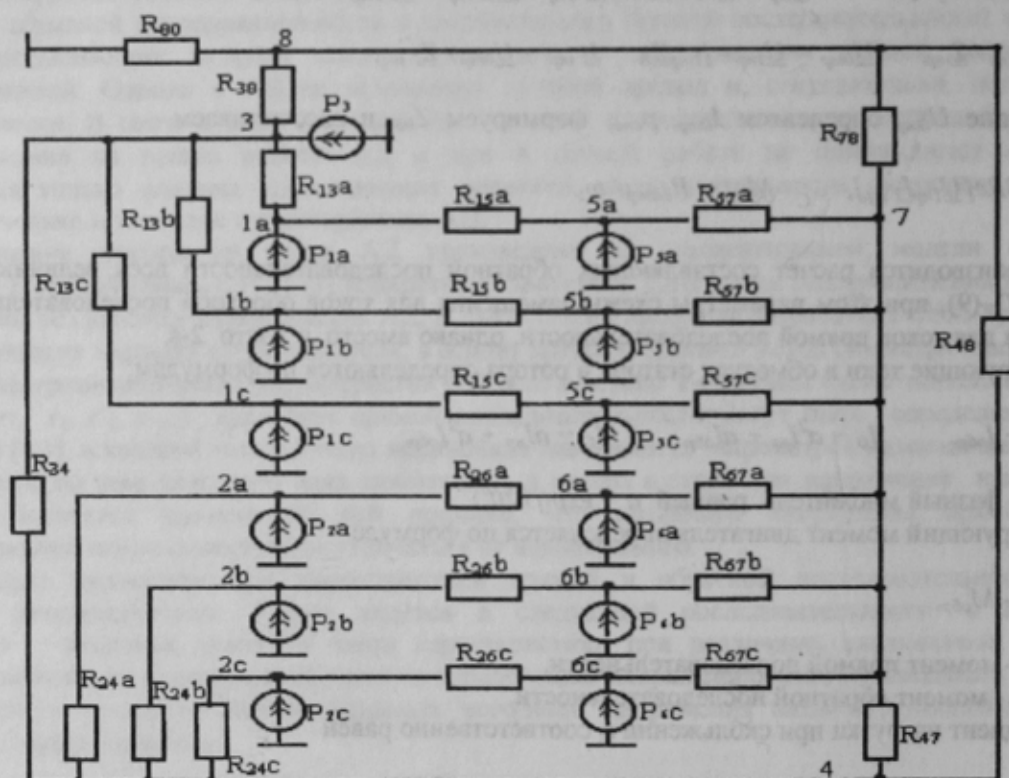


Рисунок 1 – Эквивалентная тепловая схема АД

последняя была трансформирована и приняла вид, представленный на рис. 1. Её основное отличие от известных ЭТС заключается в том, что узлы, соответствующие пазовым и лобовым частям обмоток статора и ротора, разбиты на 3 части – для фаз А, В и С.

Для этой схемы произведен расчет её параметров применительно к двигателю МТФ111-6 в продолжительном режиме работы S1. В качестве тел выбраны следующие узлы АД: 1a, 1b, 1c – пазовые части обмоток фаз А, В и С статора; 2a, 2b, 2c – пазовые части обмоток фаз А, В и С ротора; 3 и 4 – железо статора и ротора; 5a, 5b, 5c – лобовые части обмоток фаз А, В и С статора; 6a, 6b, 6c – лобовые части обмоток фаз А, В и С ротора; 7 – внутренний воздух; 8 – корпус. Мощности источников тепловыделения определены в соответствии с данными табл. 2.

Температуры узлов АД определялись путем решения системы линейных алгебраических уравнений, которая в матричном виде имеет вид:

$$\lambda \theta = P, \quad (13)$$

где $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ — матрица - столбец температур узлов (тел) ЭТС АД,

$\lambda = (\lambda_{ij})$ — матрица тепловых проводимостей ЭТС,

$P = (P_1, \dots, P_n)$ — матрица - столбец потерь в узлах АД,

n — количество тел ЭТС.

В табл.3 приведены результаты расчета температур θ всех узлов в номинальном режиме ($K_n=1, U_{np}=U_n, K_{2U}=0$), которые приняты в качестве базовых.

Таблица 3. Температуры узлов двигателя МТФ111-6 в номинальном режиме работы

№ тела	1a	2b	1c	2a	2b	2c	3	4	5a	5b	5c	6a	6b	6c	7	8
θ , град	94.1	94.1	94.1	98.4	98.4	98.4	92.6	98.2	102.4	102.4	102.4	100.6	100.6	100.6	98.8	70

В табл.4 занесены относительные значения температуры перегрева θ^* всех узлов АД при $K_n=1$ и различных значениях напряжения прямой последовательности U_{np} и K_{2U} .

Таблица 4. Относительные температуры перегрева узлов двигателя МТФ111-6 при наличии несимметрии напряжений питания

№ тела	1a	1b	1c	2a	2b	2c	3	4	5a	5b	5c	6a	6b	6c	7	8	
$U_{np}=U_n$	K_{2U}	θ^*															
	0.02	1.013	1.009	1.013	1.01	1.01	1.011	1.012	1.012	1	0.982	1	1.002	0.998	1.003	1.004	1.008
	0.04	1.037	1.029	1.036	1.035	1.034	1.035	1.035	1.034	1.029	0.994	1.025	1.027	1.019	1.028	1.027	1.037
	0.06	1.077	1.065	1.075	1.074	1.072	1.074	1.072	1.073	1.073	1.021	1.067	1.067	1.054	1.07	1.066	1.07
	0.08	1.132	1.116	1.13	1.129	1.126	1.13	1.123	1.128	1.133	1.068	1.125	1.122	1.105	1.125	1.12	1.121
0.1	1.197	1.175	1.193	1.196	1.195	1.196	1.19	1.195	1.203	1.117	1.193	1.19	1.17	1.193	1.187	1.189	
$U_{np}=0,85U_n$	K_{2U}	θ^*															
	0.02	1.319	1.311	1.319	1.339	1.337	1.339	1.314	1.311	1.231	1.23	1.26	1.206	1.205	1.207	1.205	1.198
	0.04	1.323	1.315	1.322	1.341	1.339	1.341	1.317	1.34	1.32	1.286	1.316	1.333	1.324	1.334	1.332	1.32
	0.06	1.35	1.349	1.349	1.369	1.368	1.369	1.343	1.368	1.353	1.353	1.348	1.36	1.348	1.363	1.358	1.345
	0.08	1.39	1.388	1.388	1.409	1.407	1.409	1.381	1.407	1.397	1.328	1.39	1.403	1.384	1.404	1.4	1.384
0.1	1.44	1.438	1.444	1.459	1.457	1.459	1.43	1.457	1.452	1.366	1.443	1.453	1.43	1.455	1.447	1.433	
	1.431	1.431	1.431	1.457	1.457	1.457	1.429	1.456	1.42	1.42	1.42	1.445	1.445	1.445	1.446	1.397	

При $U_{np}=0,85U_n$ и $K_{2U}=0,1$ в табл. 4 занесены данные, полученные с учетом несимметрии фазных токов (верхняя строка) и данные, соответствующие среднеквадратичным значениям фазных токов с использованием восьмительной ЭТС (нижняя строка).

Анализируя произведенные расчеты и данные табл.4, можно сделать следующие выводы.

1. Наибольшие потери мощности наблюдаются: среди статорных обмоток – в фазе А, среди роторных – в фазе С; наименьшие потери мощности имеют место в статорных и роторных обмотках фазы В.

2. При увеличении коэффициента несимметрии K_{2U} на 0.02 потери мощности в фазах А и С (и в статоре и в роторе) растут на 8-10%, а в фазе В (и в статоре и в роторе) они снижаются на 20-25%. Отношение потерь мощности фаз А и В статора, а также фаз С и В ротора для одних и тех же значений K_{2U} уменьшается при снижении напряжения питания.

3. Во всех случаях, отраженных в табл.4, наиболее нагретой оказывается лобовая часть статорной обмотки фазы А.

4. Отличия температур одних и тех же узлов АД в разных фазах значительно меньше отличия потерь мощности в этих же узлах и в зависимости от величин U_{np} и K_{2U} может достигать 9°C .

5. Температура лобовой части статорной обмотки фазы А, рассчитанная с учетом несимметрии фазных токов, на 3-5% выше её же, но рассчитанной по среднеквадратичному значению фазных токов.

6. С увеличением K_{2U} растёт температура наиболее нагретого узла АД. Так, например, при $U_{np}=U_n$ и $K_{2U}=0,08$ это увеличение составляет 13.3% по сравнению с номинальным режимом (табл.3). Особенно опасным становится перегрев лобовой части статорной обмотки фазы А при напряжении питания, меньшем номинального, и наличии его асимметрии. Так, при $U_{np}=0,85U_n$ и $K_{2U}=0,1$ он на 45.2% превышает перегрев в номинальном режиме.

Выполненное исследование показывает, что асимметрия по фазам питающих АД напряжений оказывает влияние на перераспределение температур узлов АД и её необходимо учитывать при построении систем контроля и прогнозирования температурного состояния двигателя. Полагаем, что в повторно-кратковременных режимах работы двигателя влияние указанной асимметрии питающих напряжений будет еще более существенным и требует проведения дальнейших исследований.

Предложенная методика может быть использована для определения температурного поля АД при несимметричных режимах, вызванных неисправностях в обмотках АД, например, при обрыве одной из фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. М., ВШ, 1989.-341 с., ил.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. М., Энергоиздат, 1986.-740с., ил.
3. Сыромятников Н.А. Режимы работы асинхронных электродвигателей. М., Энергоиздат, 1987.-513с., ил.