

УДК 621.313.333.018

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОВ И ТЕМПЕРАТУР АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ НЕСИММЕТРИИ СЕТИ: МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

О.Г. Пинчук

Донецкий национальный технический университет

Моделирование теплового состояния асинхронных двигателей в среде программирования MATLAB и ее расширения Simulink позволяет прогнозировать температуры обмоток электродвигателей и исключить их тепловую перегрузку в тяжелых режимах работы, одним из которых является эксплуатация при несимметричном напряжении сети.

Асинхронные двигатели (АД) широко используются в промышленности (их доля среди всех двигателей составляет 85-90%) [1]. Ежегодно на долю электродвигателей приходится 25-30% общего числа повреждений электрооборудования. В подавляющем большинстве случаев 85-95% отказы двигателей происходят из-за повреждения обмоток [1]. Одной из причин перегрева обмоток АД является несимметрия питающего напряжения [1].

В качестве характеристик несимметрии напряжения сети принято использовать [2, 3]: коэффициент несимметрии обратной последовательности (K_{2U}), напряжения прямой последовательности ($U_{пр}$) и сдвиг по фазе между симметричными составляющими напряжения прямой и обратной последовательности: $\Delta\psi = \psi_{пр} - \psi_{обр}$.

Влияние сдвига по фазе $\Delta\psi$ на тепловое состояние АД было рассмотрено в работе [4]. Так, в [4] показано, что при $K_{2U} = \text{const}$ и изменении $\Delta\psi$ температура наиболее нагруженной фазы статора изменяется в широких пределах. При некоторых значениях $\Delta\psi$ температуры обмоток статора достигают наибольшего ($\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$) и наименьшего ($\Delta\psi = \Delta\psi_{\min}$) значения. Расчет электромеханических и тепловых характеристик при проектировании АД для наиболее тяжелого случая эксплуатации (при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$) позволит исключить тепловые перегрузки, связанные с изменением $\Delta\psi$ при эксплуатации АД. Поэтому разработка методики расчета токов и температур при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$ является актуальной. Значительный интерес представляют эксплуатационные характеристики АД в случае одновременного изменения параметров несимметрии питающего напряжения ($U_{пр}$, K_{2U}) и $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$. Требуют исследования особенности АД различного типоразмера при несимметричном напряжении сети

Целью данной работы была оценка теплового состояния АД различного типоразмера (мощностью до 400кВт) в продолжительном режиме при различных характеристиках несимметрии питающего напряжения ($U_{пр}$, K_{2U} , $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$).

Для аналитических исследований при анализе установившихся режимов работы АД в условиях несимметрии источника питания был использован метод симметричных составляющих с применением Т-образной схемы замещения [5]. Математическое моделирование АД выполнялось в среде программирования MATLAB-Simulink [7]. Согласно Т-образной схеме замещения для прямой и обратной последовательности симметричные составляющие токов статора ($I_{1пр}$, $I_{1обр}$) и ротора ($I'_{2пр}$, $I'_{2обр}$) равны [5]:

$$I_{1пр} = \frac{U_{пр}}{Z_{пр}}; \quad I_{1обр} = \frac{U_{обр}}{Z_{обр}}, \quad (1)$$

$$I'_{2пр} = I_{1пр} \frac{Z_0}{Z_0 + Z_{2пр}}, \quad I'_{2обр} = I_{1обр} \frac{Z_0}{Z_0 + Z_{2обр}}. \quad (2)$$

где $Z_{пр} = Z_1 + \frac{Z_0 \cdot Z_{2с пр}}{Z_0 + Z_{2с пр}}$, $Z_{обр} = Z_1 + \frac{Z_0 \cdot Z_{2с обр}}{Z_0 + Z_{2с обр}}$, - сопротивление Т-образной схемы замещения для прямой и обратной последовательности.

Токи в обмотках ротора при несимметрии имеют несинусоидальный характер [5, с.446] и не зависят от $\Delta\psi$. Их действующие значения определяются по формулам [6, с.207]:

$$I_{2A} = I_{2B} = I_{2C} = \sqrt{I_{2пр}^2 + I_{2обр}^2}. \quad (3)$$

Результирующие токи в обмотках статора в значительной степени зависят от величины $\Delta\psi$ [4], что связано с соответствующим изменением угла между векторами симметричных составляющих токов. Так, из уравнений (1) угол сдвига симметричных составляющих тока статора ($I_{1пр}$, $I_{1обр}$) относительно симметричных составляющих напряжений ($U_{пр}$, $U_{обр}$) равен:

$$\psi_{I_{1пр}} = \psi_{U_{пр}} - \psi_{Z_{пр}}; \quad \psi_{I_{1обр}} = \psi_{U_{обр}} - \psi_{Z_{обр}}. \quad (4)$$

Тогда сдвиг по фазе между составляющими тока статора прямой и обратной последовательности:

$$\Delta\psi_I = \psi_{I_{1пр}} - \psi_{I_{1обр}} = (\psi_{U_{пр}} - \psi_{U_{обр}}) - (\psi_{Z_{пр}} - \psi_{Z_{обр}}), \text{ или:} \\ \Delta\psi_I = \Delta\psi - \Delta\psi_Z. \quad (5)$$

где $\Delta\psi_1$ — разность фаз токов прямой и обратной последовательности; $\Delta\psi$ — разность фаз напряжений прямой и обратной последовательности; $\Delta\psi_z$ — разность фаз сопротивлений для прямой и обратной последовательности

$$\Delta\psi_z = \psi_{z_{пр}} - \psi_{z_{обр}} = \arctg(Z_{пр}) - \arctg(Z_{обр}). \quad (6)$$

Величина $\Delta\psi_z$ может быть найдена по паспортным данным асинхронного двигателя. Например, на основании приведенных в справочной литературе данных относительно параметров Т-образной схемы замещения [5, с.411] диапазон изменения углов для асинхронных машин серии 4А составляет: $\Delta\psi_z \approx -(25 \div 70^\circ)$. Из (5) следует, что при $\Delta\psi = 0^\circ$, принимаемом по умолчанию в соответствии с ГОСТ 13109 – 97, $\Delta\psi_1 = \Delta\psi_z$. То есть при $\Delta\psi = 0^\circ$ симметричные составляющие токов статора всегда будут сдвинуты на некоторый угол $\Delta\psi_z \approx -(25^\circ \div 70^\circ)$.

При изменении $\Delta\psi$ угол сдвига между симметричными составляющими токов статора изменяется.

В случае, когда $\Delta\psi = \Delta\psi_z - 180^\circ$ сдвиг по фазе между составляющими токов прямой и обратной последовательности равен $\Delta\psi_1 = 180^\circ$. Векторная диаграмма (ВД) при $\Delta\psi_1 = 180^\circ$ для фазы

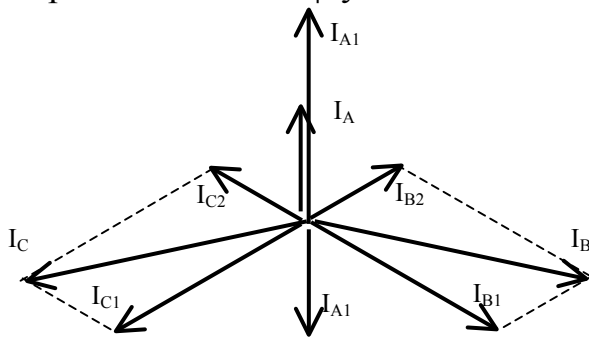


Рис. 1 Векторная диаграмма токов в обмотках статора при $\Delta\psi = \Delta\psi_{min}$

А представлена на рис. 1. Результирующие значения токов, полученные из ВД (рис. 1):

$$I_{1A} = I_{1пр} - I_{1обр}, \quad (7)$$

$$I_{1B} = I_{1C} = \sqrt{(I_{1пр} + I_{1обр})^2 - I_{1пр} I_{1обр}} \quad (8)$$

При $\Delta\psi = \Delta\psi_z$ — сдвиг по фазе между симметричными составляющими токов в соответствии с уравнением (5) равен $\Delta\psi_1 = 0^\circ$. Тогда векторная диаграмма примет вид (рис. 2). Полученные из ВД (рис.2) значения токов в фазах статора равны:

$$I_{1B} = I_{1C} = \sqrt{(I_{1пр} + I_{1обр})^2 - 3I_{1пр} I_{1обр}} \quad (9)$$

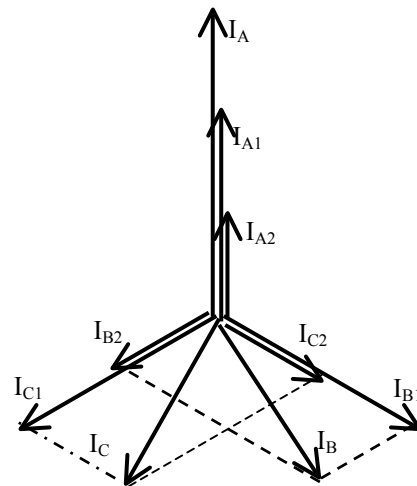


Рис. 2 Векторная диаграмма токов в обмотках статора при $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$

$$I_{1A} = I_{1пр} + I_{1обр} \quad (10)$$

Из выше изложенного следует, что при $K_{2U} = \text{const}$ и изменении $\Delta\psi$ действующее значение тока наиболее нагруженной фазы статора может принимать значения от $I_{1ф} = \sqrt{(I_{1пр} + I_{1обр})^2 - I_{1пр}I_{1обр}}$ до $I_{1ф} = I_{1пр} + I_{1обр}$. Таким образом, при заданном уровне несимметрии напряжения сети наибольшие токовые перегрузки в обмотках статора имеют место при совпадении направлений симметричных составляющих токов одной из фаз, что достигается при значениях $\Delta\psi = \Delta\psi_z$, которые для удобства обозначим $\Delta\psi_{\max}$. Наименьшие токовые перегрузки в обмотках статора при заданном K_{2U} наблюдаются при противоположных направлениях $I_{пр}$ и $I_{обр}$, что достигается при значении $\Delta\psi = \Delta\psi_z - 180^\circ$, которые для удобства обозначим $\Delta\psi_{\min}$.

Дальнейшее исследование влияния несимметрии напряжения сети на эксплуатационные характеристики АД выполним для наиболее тяжелого случая, который имеет место при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$ [4, с.125].

Необходимо отметить, что значения $I_{пр}$ и $I_{обр}$ существенно зависят как от характеристик несимметрии источника питания (K_{2U} , $U_{пр}$, $\Delta\psi$), так и от параметров схемы замещения рассматриваемого АД. Определяющим фактором, влияющим на токи прямой последовательности, является параметр Т-образной схемы замещения – X_o^* [6, с.446], а на токи обратной последовательности – индуктивное сопротивление короткого замыкания X_k^* [6, с.446]. Их относительные значения для общепромышленных АД мощностью до 400кВт могут изменяться в пределах $X_k^* = 0.15 \div 0.25$, $X_o^* = 2 \div 4$ [6].

В качестве примера в табл. 1 представлены результаты расчетов токов обратной последовательности статора ($I_{1обр}$) и ротора ($I_{2обр}$) при помощи метода симметричных составляющих с применением Т-образной схемы замещения при различных значениях X_k^* и $U_{обр}$.

Таблица 1

Токи обратной последовательности статора ($I_{1обр}$) и ротора ($I_{2обр}$) при различных значениях X_k^* и $U_{обр}$

$\frac{U_{обр}}{U_H}$	$X_k^* = 0.1$		$X_k^* = 0.15$		$X_k^* = 0.20$		$X_k^* = 0.25$		$X_k^* = 0.3$	
	$I_{1обр}^*$	$I_{2обр}^*$	$I_{1обр}^*$	$I_{2обр}^*$	$I_{1обр}^*$	$I_{2обр}^*$	$I_{1обр}^*$	$I_{2обр}^*$	$I_{1обр}^*$	$I_{2обр}^*$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.02	0.15	0.39	0.12	0.36	0.10	0.32	0.08	0.28	0.02	0.14
0.04	0.29	0.56	0.24	0.52	0.19	0.45	0.15	0.40	0.04	0.20
0.1	0.75	0.89	0.60	0.82	0.48	0.70	0.37	0.52	0.10	0.33

Результаты расчета токов прямой последовательности для статора ($I_{1пр}$) и ротора ($I_{2пр}$) при различных относительных значениях X_0^* и различных значениях $U_{пр}$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Токи обратной последовательности статора ($I_{1обр}$) и ротора ($I_{2обр}$) при различных значениях X_0^* и $U_{пр}$

$\frac{U_{пр}}{U_n}$	$X_0^* = 2$		$X_0^* = 2.5$		$X_0^* = 3$		$X_0^* = 3.5$		$X_0^* = 4$		$X_0^* = 4.5$	
	$I_{1пр}^*$	$I_{2обр}^*$	$I_{1пр}^*$	$I_{2обр}^*$	$I_{1обр}^*$	$I_{2обр}^*$	$I_{1обр}^*$	$I_{2обр}^*$	$I_{1обр}^*$	$I_{2обр}^*$	$I_{1обр}^*$	$I_{2обр}^*$
1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.95	1.01	1.01	1.03	1.04	1.04	1.07	1.07	1.09	1.08	1.10	1.09	1.11
0.9	1.03	1.03	1.07	1.08	1.09	1.15	1.13	1.20	1.23	1.47	1.26	1.5

По данным табл. 1-2 были определены токи в обмотках статора при $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ из выражений (7)-(8), а токи в обмотках ротора – из (2). Далее рассчитывались потери при различных характеристиках несимметрии ($U_{пр}$ и $U_{обр}$, $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$), которые являются исходными данными для теплового расчета.

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. Система алгебраических уравнений в матричной форме, полученная с помощью ЭТС, для расчета температур в установившемся состоянии, имеет вид: $\Lambda\theta = P$. Здесь $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_8)^T$ - вектор столбец превышения температур соответствующих узлов над температурой окружающей среды θ_0 ; $\Lambda = (\lambda_{ij})$ - матрица теплопроводностей ЭТС АД; $P = (P_1, \dots, P_8)^T$ - вектор потерь мощности в узлах АД.

В режиме S1 несимметрия питающего напряжения сопровождается ростом температур всех узлов, однако, наибольшие тепловые нагрузки испытывает лобовая часть наиболее нагруженной фазы статора. Значения температур лобовой части наиболее нагруженной фазы статора (θ_5) при различных характеристиках напряжения ($U_{пр}$, K_{2U} , $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$) и параметрах схемы замещения (X_k^* и X_0^*) в продолжительном режиме S1 представлены в табл. 3. В качестве базовых были приняты температуры соответствующих узлов при номинальном входном напряжении.

Сравнение полученных результатов с экспериментальными значениями температур АД МТН 111-6 ($X_k^* = 0.2$, $X_o^* = 3.55$) и АИ-УМ225М4 ($X_k^* = 0.22$, $X_o^* = 4.03$) показывает, что расхождение между приведенными в табл. 3 и экспериментальными значениями не превышает 5-7%.

Таблица 3

Температура наиболее нагретого узла АД при различных характеристиках напряжения ($U_{пр}$, K_{2U} , $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$) и параметрах схемы замещения (X_k^* и X_o^*) в продолжительном режиме S1

$U_{пр}$	X_o^*	$K_{2U} = 0\%$			$K_{2U} = 2\%$			$K_{2U} = 4\%$			$K_{2U} = 10\%$		
		X_k^* =0.15÷0.27	X_k^* =0.1	X_k^* =0.15	X_k^* =0.25	X_k^* =0.1	X_k^* =0.15	X_k^* =0.25	X_k^* =0.1	X_k^* =0.15	X_k^* =0.25		
1.0 U_H	2÷4	1.03	1.14	1.09	1.07	1.25	1.21	1.19	1.55	1.45	1.35		
0.95 U_H	4	1.06	1.20	1.13	1.10	1.31	1.28	1.24	1.84	1.75	1.56		
	3	1.00	1.14	1.09	1.07	1.29	1.25	1.21	1.68	1.68	1.53		
0.9 U_H	2	0.97	1.11	1.06	1.04	1.25	1.22	1.19	1.78	1.65	1.52		
	4	1.08	1.22	1.17	1.15	1.53	1.49	1.45	2.23	2.05	1.85		
0.9 U_H	3	0.98	1.12	1.07	1.05	1.31	1.28	1.27	1.96	1.81	1.68		
	2	0.94	1.08	1.03	0.99	1.27	1.24	1.22	1.84	1.69	1.53		

Из данных, представленных в табл. 3 следует, что при допустимых ГОСТ 13109 –97 значениях показателей качества электрической энергии ($K_{2U} \leq 2\%$, $|\delta U| \leq 5\%$) температурные перегрузки в следствие изменения $\Delta\psi$ могут достигать 10-20%. По результатам исследований выявлено (см. табл. 5), как должна изменяться нагрузка в режиме S1 при несимметрии напряжения, чтобы температура наиболее нагруженного узла АД не превышала допустимое значение.

Таблица 5

Нагрузка на валу АД в режиме S1 при различных характеристиках напряжения ($U_{пр}$, K_{2U} , $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$) и $\theta = \theta_{доп}$

$U_{пр}$	X_o^*	$K_{2U} = 0\%$		$K_{2U} = 2\%$		$K_{2U} = 4\%$		$K_{2U} = 10\%$	
		$X_k^* = 0.15 \div 0.25$	$X_k^* = 0.15$	$X_k^* = 0.25$	$X_k^* = 0.15$	$X_k^* = 0.25$	$X_k^* = 0.15$	$X_k^* = 0.25$	
1.0	2 ÷ 4	1.00	0.95	0.98	0.93	0.96	0.75	0.79	
0.95	2	1.00	0.95	0.98	0.93	0.96	0.75	0.79	
	4	0.98	0.94	0.96	0.92	0.95	0.74	0.78	
0.9	2	1.00	0.95	0.98	0.93	0.96	0.75	0.79	
	4	0.87	0.85	0.87	0.82	0.86	0.70	0.76	

Выводы. В статье установлено, что при $K_{2U} = const$ наибольшие тепловые перегрузки обмоток статора имеют место при совпадении по направлению симметричных составляющих токов одной из фаз, что достигается при $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$. Наименьшие токовые перегрузки в об-

мотках статора при заданном значении K_{2U} наблюдаются при противоположных направлениях $I_{пр}$ и $I_{обр}$, что достигается при $\Delta\psi = \Delta\psi_{min}$.

Предложен алгоритм расчета токов и температур элементов конструкции обмоток АД при $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$. Применение алгоритма при проектировании АД позволит исключить тепловые перегрузки, связанные с изменением $\Delta\psi$ при эксплуатации. С помощью предложенного алгоритма была выполнена оценка теплового состояния АД различного типоразмера (мощностью до 400кВт) в продолжительном режиме при различных характеристиках несимметрии питающего напряжения ($U_{пр}$, K_{2U} , $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$), в результате чего установлено:

- при допустимых ГОСТ 13109 –97 значениях показателей качества электрической энергии δU и K_{2U} ($K_{2U} \leq 2\%$, $|\delta U| \leq 5\%$) тепловые перегрузки, связанные с изменением $\Delta\psi$ могут достигать 10-20%, в результате сокращение срока безаварийной эксплуатации может снизиться до 20-80%;
- определены необходимые величины снижения нагрузок, позволяющие сохранить ресурс изоляционных материалов.

Библиография

1. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. -3-е изд. испр. и доп. - М.: Высшая школа, 2002. - 757 с.

2. 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.

3. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях.– М: Энергоатомиздат. - 1986. – 174с.

4. Федоров М.М., Пинчук О.Г. Особенности теплового состояния асинхронных двигателей при несимметричном питающем напряжении. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: – Кременчуг. – 2004. – Вип. 2(25). - С. 122-125.

5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М: Энергия. – 1980. – 928с.

6. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учебник для вузов.–М.: Энергоатомиздат.–1989. – 528с.

7. Толочко О.І., Чекавський Г.С., Мірошник Д.М. Векторні моделі асинхронного двигуна у середовище пакета Matlab./ праці Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2003, Том 1, №2 (19) – с.199 – 202.

Дата поступления в редколлегию 16.06.2007.