

*О.Г. ПИНЧУК*

## **ОЦЕНКА ТОКОВ И ТЕМПЕРАТУР АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МОЩНОСТЬЮ ДО 400 кВт ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ НЕСИММЕТРИИ СЕТИ: МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ**

Предложена методика оценки электромеханических и тепловых характеристик асинхронных двигателей (АД) при асимметрии напряжения сети для наиболее неблагоприятного значения сдвига по фазе между напряжениями прямой и обратной последовательности. Использование методики при проектировании электродвигателей позволяет исключить перегрев обмоток, связанный с изменением фазового сдвига при эксплуатации АД.

Запропоновано методику оцінки електромеханічних і теплових характеристик асинхронних двигунів (АД) при асиметрії напруги мережі для найбільш несприятливого значення зрушення по фазі між напругами прямої та зворотної послідовності. Використання методики при проектуванні електродвигунів дозволяє виключити перегрів обмоток, пов'язаний зі зміною фазового зрушення при експлуатації АД.

Асинхронные двигатели 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 асимметрия питающего напряжения [2].

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

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 ( $\Delta\psi = \Delta\psi_{min}$ ) значений. Расчет электромеханических и тепловых характеристик на этапе проектирования АД для наиболее тяжелого случая эксплуатации (при  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ ) позволит исключить тепловые перегрузки, связанные с изменением  $\Delta\psi$ , при эксплуатации электродвигателя. 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 асимметрии питающего напряжения ( $U_{np}$ ,  $K_{2U}$ ) и  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ . Электромеханические и тепловые характеристики АД в продолжительном режиме при изменении  $U_{np}$  и  $K_{2U}$  были рассмотрены в работах [5], однако особенности эксплуатационных характеристик АД различного типоразмера при несимметричном напряжении сети требуют дополнительного исследования.

**Целью данной работы** была оценка теплового состояния АД различного типоразмера (мощностью 1÷400 кВт) в продолжительном режиме при различных характеристиках асимметрии питающего напряжения ( $U_{np}$ ,  $K_{2U}$ ,  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ ).

Расчет токов осуществлялся с помощью метода симметричных составляющих с применением Т-образной схемы замещения [6]. Согласно Т-образной схеме замещения для прямой и обратной последовательности симметричные составляющие токов статора ( $I_{1np}$ ,  $I_{1обр}$ ) и ротора ( $I'_{2np}$ ,  $I'_{2обр}$ ) равны [6]:

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

$$I'_{2np} = I_{1np} \frac{z_0}{z_0 + z'_{2np}}, I'_{2обр} = I_{1обр} \frac{z_0}{z_0 + z'_{2обр}}. \quad (2)$$

где  $z_{npi} = z_1 + \frac{z_0 \cdot z_{2s pi}}{z_0 + z_{2s pi}}$ ,  $z_{обрi} = z_1 + \frac{z_0 \cdot z_{2s обрi}}{z_0 + z_{2s обрi}}$ , – сопротивления Т-

образной схемы замещения для прямой и обратной последовательности.

Токи в обмотках ротора при асимметрии имеют несинусоидальный характер [6] и не зависят от  $\Delta\psi$ , их действующие значения определяются по формулам [7]:

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

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 ( $I_{1np}$ ,  $I_{1обр}$ ) относительно симметричных составляющих напряжений ( $U_{np}$ ,  $U_{обр}$ ) равен:

$$I_{1np} = U_{np} - z_{np}; \Psi_{I_{1обр}} = \Psi_{U_{обр}} - \Psi_{z_{обр}}. \quad (4)$$

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

$$I = I_{1np} - I_{1обр} = (U_{np} - U_{обр}) - (z_{np} - z_{обр}), \text{ или:}$$

$$\Delta\psi_1 = \Delta\psi - \Delta\psi_z. \quad (5)$$

где  $\Delta\psi_I$  – 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. 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 для асинхронных машин серии 4А диапазон изменения углов составляет [6]:

$$\Delta\psi_Z = \psi_{z_{np}} - \psi_{z_{обр}} = \arctg(Z_{np}) - \arctg(Z_{обр}) \approx -(20 \div 80^\circ). \quad (6)$$

Из (5) следует, что при  $\Delta\psi = 0^\circ$ , принимаемом по умолчанию в соответствии с ГОСТ 13109-97,  $\Delta\psi_I = \Delta\psi_Z$ . То есть при  $\Delta\psi = 0^\circ$  симметричные составляющие токов статора всегда будут сдвинуты на некоторый угол  $\Delta\psi_Z \approx -(20^\circ \div 80^\circ)$ . 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  $\Delta\psi_I = 180^\circ$ . Векторная диаграмма (ВД) при  $\Delta\psi_I = 180^\circ$  для фазы А представлена на рис. 1.

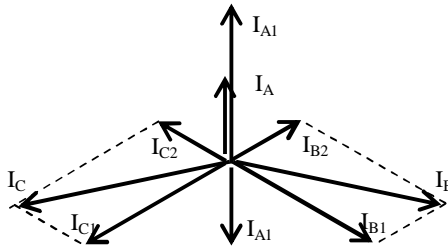


Рис. 1 Векторная диаграмма токов в обмотках статора при  $\Delta\psi = \Delta\psi_{min}$

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

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

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

При  $\Delta\psi = \Delta\psi_Z$  – сдвиг по фазе между симметричными составляющими токов в соответствии с уравнением (5) равен  $\Delta\psi_I = 0^\circ$ . В этом векторная диаграмма имеет вид (рис. 2).

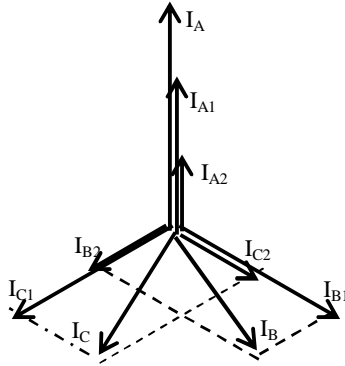


Рис. 2 Векторная диаграмма токов в обмотках статора при  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$

Полученные из ВД (рис. 2) значения токов в фазах статора равны:

$$I_{1A} = I_{1np} + I_{1обр} \quad (9)$$

$$I_{1B} = I_{1C} = \sqrt{(I_{1np} + I_{1обр})^2 - 3I_{1np}I_{1обр}} \quad (10)$$

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  $I_{1\phi} = I_{1np} + I_{1обр}$  до  $I_{1\phi} = \sqrt{(I_{1np} + I_{1обр})^2 - I_{1np}I_{1обр}}$ . При заданном уровне асимметрии 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  $I_{np}$  и  $I_{обр}$ , что достигается при значении  $\Delta\psi = \Delta\psi_z - 180^\circ$ , которые для удобства обозначим  $\Delta\psi_{min}$ . Дальнейшее исследование влияния асимметрии напряжения сети на эксплуатационные характеристики АД выполним для наиболее неблагоприятного случая, который имеет место при  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$  [4].

Необходимо отметить, что количественные значения  $I_{np}$  и  $I_{обр}$  существенно зависят как от характеристик асимметрии источника питания ( $K_{2U}$ ,  $U_{np}$ ,  $\Delta\psi$ ), так и от параметров схемы замещения рассматриваемого АД. Так, определяющим фактором, влияющим на токи прямой последовательности, является параметр Т-образной схемы замещения –  $X_o^*$  [6], а на токи обратной последовательности – индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_k^*$  [6]. Среди асинхронных двигателей различают: общепромышленные АД (двигатели серии 4А) [1, 8]; крановые двигатели [9]; взрывозащищенные АД

[10] и др.

Общепромышленные АД серии 4А, рассчитанные на напряжение до 1000В, выпускаются в следующих модификациях [1, 8]:

– АД основного исполнения, в этих двигателях относительная величина параметров схемы замещения колеблется в пределах  $X_K^* = 0.15 \div 0.3$ ,  $X_O^* = 1.5 \div 6$ . Например, в АД 4А355М4У3 мощностью 315кВт  $X_K^* = 0.24$ ,  $X_O^* = 5.7$ , в двигателе 4А180М2У3 мощностью 30 кВт  $X_K^* = 0.18$ ,  $X_O^* = 4$ , в двигателе 4А80А2У3 мощностью 1.5 кВт данные величины составляют  $X_K^* = 0.11$ ,  $X_O^* = 2.5$ ;

– АД с повышенным пусковым моментом, у этих двигателей параметры схемы замещения принимают значения в диапазоне  $X_K^* = 0.2 \div 0.3$ ,  $X_O^* = 2 \div 3.6$ . Например, в АД 4АР200Л4У3 мощностью 45кВт  $X_K^* = 0.22$ ,  $X_O^* = 3.4$ .

– АД с повышенным скольжением, у которых величины параметров схемы замещения находятся в пределах  $X_K^* = 0.14 \div 0.22$ ,  $X_O^* = 1.6 \div 5$  (например, в АД 4АС200М4У3 мощностью 31.5 кВт –  $X_K^* = 0.22$ ,  $X_O^* = 4.5$ , в АД 4АС250М4У3 мощностью 63 кВт –  $X_K^* = 0.13$ ,  $X_O^* = 3.9$ );

– АД с фазным ротором, у которых величина  $X_K^*$  изменяется от 0.13 до 0.4, а величина  $X_O^*$  изменяется от 2 до 4. Например, в АД 4АНК355М4У3 мощностью 400 кВт  $X_K^* = 0.26$ ,  $X_O^* = 4.8$ , в АД 4АК180М6У3 мощностью 18.5 кВт –  $X_K^* = 0.15$ ,  $X_O^* = 3.1$ .

Крановые двигатели предназначены для обеспечения тяговых характеристик и характеризуются насыщенной магнитной системой [9]. Величина  $X_O^*$  у этих двигателей относительно небольшая и изменяется от 1 ÷ 1.5 (АД МТКН411-6, МТКН511-8, МТН711-10) до 2 ÷ 2.5 (АД МТН 111-6, МТН 211-6), а величина  $X_K^*$  от 0.1 ÷ 0.15 (АД МТКН411-6, МТКН511-8, МТН711-10) до 0.2 ÷ 0.25 (АД МТН111-6, МТН211-6).

Во взрывозащищенных АД [10] относительная величина параметров схемы замещения колеблется в пределах  $X_K^* = 0.05 \div 0.25$ ,  $X_O^* = 1.0 \div 3.5$  (например, у АД электропривода очистных комбайнов типа ЭДКО4-4МУ5 мощностью 80 кВт данные величины составляют  $X_K^* = 0.07$ ,  $X_O^* = 1.56$ , у АД ЭКВ3,5-125У5 мощностью 125 кВт –  $X_K^* = 0.16$ ,  $X_O^* = 3.0$ ).

В качестве примера в табл. 1 представлены результаты расчетов токов

обратной последовательности статора ( $I_{1обр}$ ) и ротора ( $I_{2обр}$ ) с применением Г-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  $U_{обр}$

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

Из анализа результатов, представленных в табл. 1 следует, что при одинаковом уровне  $U_{обр}$  относительные значения токов ( $I_{1обр}$ ,  $I_{2обр}$ ) в зависимости от  $X_K^*$  могут различаться в 3-6 раз. Например, при  $U_{обр} = 0.04U_n$  ток обратной последовательности статора при  $X_K^* = 0.3$  равен  $I_{1обр}^* = 0.04$ , а при  $X_K^* = 0.15$  – составляет  $I_{1обр}^* = 0.24$  и т.д.

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

Таблица 2 – Токи прямой последовательности статора ( $I_{1пр}$ ) и ротора ( $I_{2пр}$ ) при различных значениях  $X_o^*$  и  $U_{пр}$

$\frac{U_{пр}}{U_n}$	$X_o^* = 2$		$X_o^* = 3$		$X_o^* = 4$		$X_o^* = 5$	
	$I_{1пр}^*$	$I_{2пр}^*$	$I_{1пр}^*$	$I_{2пр}^*$	$I_{1пр}^*$	$I_{2пр}^*$	$I_{1пр}^*$	$I_{2пр}^*$
1.0	1	1	1	1	1	1	1	1
0.95	1.05	1.12	1.07	1.12	1.10	1.12	1.12	1.13
0.9	1.15	1.27	1.18	1.265	1.25	1.26	1.26	1.27

По данным табл. 1-2 были определены токи в обмотках статора при  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$  из выражений (9)-(10), а токи в обмотках ротора – из (3). Далее рассчитывались потери при различных характеристиках асимметрии напряжения сети, которые являются исходными данными для теплового расчета.

Расчёт теплового состояния АД осуществлялся с помощью системы дифференциальных уравнений, полученных на основании эквивалентной тепловой схемы (ЭТС) [11]. Для этого использовалась ЭТС, разработанная

проф. Федоровым М.М., которая позволяет учесть неравномерный нагрев электродвигателя при различных характеристиках асимметрии источника питания [11]. 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 асимметрии 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  $\theta_0$ ;  $\Lambda = (\lambda_{ij})$  – матрица теплопроводностей ЭТС АД;  $P = (P_1, \dots, P_8)^T$  – вектор потерь мощности в узлах АД.

В режиме S1 асимметрия питающего напряжения сопровождается ростом температур всех узлов, однако, наибольшие тепловые нагрузки испытывает лобовая часть наиболее нагруженной фазы статора и лобовые части обмотки ротора [5]. Значения температур лобовой части наиболее нагретого узла АД при различных характеристиках напряжения ( $U_{np}$ ,  $K_{2U}$ ,  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ ) и различных параметрах схемы замещения АД ( $X_K^*$  и  $X_O^*$ ) в продолжительном режиме S1 представлены в табл. 3. В качестве базовой была принята температура лобовой части обмотки статора при симметричном напряжении сети ( $\theta_B = 114$  °C).

Сравнение полученных результатов с экспериментальными значениями температур АД МТН111-6 ( $X_K^* = 0.2$ ,  $X_O^* = 3.55$ ) и АИУМ225М4 ( $X_K^* = 0.22$ ,  $X_O^* = 4.03$ ) показало, что расхождение между приведенными в табл. 3 и экспериментальными значениями не превышает 5-7 %.

Таблица 3 – Температура наиболее нагретого узла АД при различных характери-

ках напряжения ( $U_{np}$ ,  $K_{2U}$ ,  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ ) и различных параметрах схемы замещения ( $X_K^*$  и  $X_O^*$ ) в продолжительном режиме S1

$U_{np}$	$X_O^*$	$K_{2U}=0\%$	$K_{2U}=2\%$			$K_{2U}=4\%$		
		$X_K^* = 0.1 \div 0.3$	$X_K^* = 0.1$	$X_K^* = 0.2$	$X_K^* = 0.3$	$X_K^* = 0.1$	$X_K^* = 0.2$	$X_K^* = 0.3$
$1.0U_n$	$X_O^* = 2 \div 4$	1.00	1.06	1.03	1.02	1.14	1.08	1.07
$0.95U_n$	$X_O^* = 2$	1.03	1.09	1.05	1.04	1.17	1.11	1.10
	$X_O^* = 3$	1.07	1.13	1.09	1.08	1.21	1.15	1.14
	$X_O^* = 4$	1.12	1.18	1.14	1.13	1.26	1.20	1.19
$0.9U_n$	$X_O^* = 2$	1.07	1.14	1.09	1.08	1.21	1.15	1.14
	$X_O^* = 3$	1.18	1.37	1.20	1.19	1.32	1.26	1.25
	$X_O^* = 4$	1.28	1.57	1.30	1.29	1.42	1.36	1.35

Полученные температуры наиболее нагруженного узла АД позволяют определить ресурс изоляционного материала. При температуре  $\theta$  и известных сроке службы  $D_n$  и допустимой номинальной температуре  $\theta_n$  срок службы изоляции  $D$  равен [11]:  $D = D_n \cdot \exp\left(-\frac{\theta - \theta_n}{\Delta\theta}\right)$ , где величина  $\Delta\theta$  принимается постоянной для данного класса изоляции [11]. В табл. 4 представлен относительный срок службы изоляционных материалов обмоток статора ( $D_1^*$ ) и ротора ( $D_2^*$ ) при  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ ,  $K_{2U} = 2\%$  и  $U_{np} = 0.95U_n$  и различных значениях  $X_K^*$  и  $X_O^*$ .

Из данных, представленных в табл. 3 следует, что при допустимых ГОСТ 13109-97 значениях показателей качества электрической энергии ( $K_{2U} \leq 2\% \mid \psi \leq 5\%$ ) температурные перегрузки в следствие изменения  $\Delta\psi$  могут достигать 5-18 %. В результате срок безаварийной эксплуатации АД (см. табл. 4) может сократиться до 40-60 % первоначального.

Таблица 4 – Относительный срок службы изоляционных материалов при  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ ,  $K_{2U} = 2\%$  и  $U_{np} = 0.95U_n$  и различных значениях  $X_K^*$  и  $X_O^*$ .

$X_O^*$	$X_K^* = 0.15$		$X_K^* = 0.20$		$X_K^* = 0.25$		$X_K^* = 0.3$	
	$D_1^*$	$D_2^*$	$D_1^*$	$D_2^*$	$D_1^*$	$D_2^*$	$D_1^*$	$D_2^*$
4	0.40	0.42	0.47	0.45	0.5	0.45	0.53	0.47
3	0.47	0.47	0.53	0.5	0.56	0.5	0.59	0.53
2	0.56	0.53	0.63	0.59	0.67	0.59	0.71	0.63



По результатам исследований выявлено (табл. 5), как должна изменяться нагрузка в режиме S1 при асимметрии напряжения, чтобы температура наиболее нагруженного узла АД не превышала допустимое значение.

Таблица 5 – Нагрузка на валу АД в режиме S1 при различных характеристиках асимметрии напряжения ( $U_{np}$ ,  $K_{2U}$ ,  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ ) при  $\theta = \theta_{доп}$

$U_{np}$	$X_o^*$	$K_{2U} = 0\%$		$K_{2U} = 2\%$		$K_{2U} = 4\%$		$K_{2U} = 10\%$	
		$X_K^* = 0.1 \div 0.3$	$X_K^* = 0.1$	$X_K^* = 0.3$	$X_K^* = 0.1$	$X_K^* = 0.3$	$X_K^* = 0.1$	$X_K^* = 0.3$	
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	

Результаты оценки влияния параметров схемы замещения  $X_o^*$  и  $X_K^*$  на температурное поле АД при асимметрии напряжения сети позволяют обобщить полученные в статье выводы о тепловом состоянии АД в повторно-кратковременном режиме на достаточно широкий класс двигателей, у которых  $X_o^* = 2 \div 4$  и  $X_K^* = 0.15 \div 0.3$ .

**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 обмотках статора при заданном значении  $K_{2U}$  наблюдаются при противоположных направлениях  $I_{np}$  и  $I_{обр}$ , что достигается при  $\Delta\psi = \Delta\psi_{min}$ . Установлены соотношения для расчета величин  $\Delta\psi_{max}$ ,  $\Delta\psi_{min}$  по известным параметрам схемы замещения АД.

Предложена методика расчета токов и температур элементов конструкции обмоток АД при  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ . Применение данной методики на этапе проектирования АД позволит исключить тепловые перегрузки, связанные с изменением  $\Delta\psi$  при эксплуатации. С помощью предложенной методики была выполнена оценка теплового состояния АД различного типоразмера (мощностью 1÷400 кВт) в продолжительном режиме при различных характеристиках асимметрии питающего напряжения ( $U_{np}$ ,  $K_{2U}$ ,  $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ ), в результате чего установлено:

- при допустимых ГОСТ 13109-97 значениях показателей качества электрической энергии  $\delta U$  и  $K_{2U}$  ( $K_{2U} \leq 2\%$ ,  $|\delta U| \leq 5\%$ ) тепловые перегрузки, связанные с изменением  $\Delta\psi$  могут достигать 5-18 %, в результате сокращение срока безаварийной эксплуатации может снизиться до 40-60 %;
- определены необходимые величины снижения нагрузок, позволяющие сохранить ресурс изоляционных материалов.

**Список литературы:** 1. Проектирование электрических машин. – 3-е изд. испр. и доп. / Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. – М.: Высшая школа, 2002. – 757 с. 2. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М: Энергоатомиздат. – 1986. – 174 с. 3. 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. 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. Федоров М.М., Пинчук О.Г. Тепловое состояние асинхронных двигателей в повторно-кратковременном режиме при несимметрии источника питания / Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». – Донецьк – 2004. – Вип. 98. – С.31-34. 6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М: Энергия. – 1980. – 928с. 7. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 528с. 8. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И., Соболенская Е. А. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504с. 9. Крановое электрооборудование. Справочник / Под ред. А.А. Рабиновича. – М.: Энергия, 1979. – 240с. 10. Стариков Б.Я., Азарх В.Л., Рабинович З.М. Асинхронный электропривод очитных комбайнов. – М.: Недра, 1981. – 288с. 11. Федоров М.М., Денник В.Ф., Корощенко А.В. Исследование распределения температур узлов асинхронного двигателя при несимметрии питающих напряжений // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. электротехника и энергетика – Донецк – 1999. – Вып. 4. – С. 138-141.

*Поступила в редколлегию 12.10.07*