

ЗАЩИТА ОТ ТЕПЛОВЫХ ПЕРЕГРУЗОК ОБМОТКОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Пинчук О.Г.

Донецкий национальный технический университет

OlgaPinchuk@yandex.ru

Ежегодно на долю асинхронных двигателей (АД) приходится 20-25% общего числа повреждений электрооборудования [1]. В подавляющем большинстве случаев 85-95% отказы двигателей происходят из-за повреждения обмоток [2]. Как показывает статистика до 80% аварий АД напрямую или косвенно связаны с авариями сетевого напряжения [2], из них до 60% происходит вследствие нарушения симметрии питающего напряжения [2]. В качестве параметров несимметрии напряжения сети принято использовать [3]: коэффициент несимметрии обратной последовательности (K_{2U}), напряжение прямой последовательности ($U_{пр}$) и сдвиг по фазе между симметричными составляющими напряжения прямой и обратной последовательности: $\Delta\psi = \psi_{пр} - \psi_{обр}$.

Современные устройства защиты, основанные в соответствии с ГОСТ 27888-88 на непосредственном измерении температур обмоток не всегда [4] смогут выполнить свои функции при работе АД в условиях несимметричного питающего напряжения, так как построены в основном на использовании устройств, реагирующих на температуру (термодетектор или температурно-токовое реле). Эти устройства, обладающие несомненными преимуществами, связанными с непосредственным измерением температуры, в ряде случаев [4] не могут эффективно осуществлять защиту обмоток от тепловых перегрузок. Например [4], практически невозможно передать маломощный сигнал от термодатчиков, встроенных в обмотку АД, к системам управления электроприводом подвижных механизмов (крановых АД, получающих питание через троллеи) и механизмов, находящихся на значительном удалении от их систем управления [4]; за счет большой толщины изоляции обмотки АД мощностью выше 1кВ резко снижается точность отображения температуры [4] и пр.

Трудности косвенной оценки теплового состояния АД по токам в обмотках статора, связаны с необходимостью учета параметров несимметричного режима сети ($U_{пр}$, K_{2U} , $\Delta\psi$) [6]. Например, по результатам исследования теплового состояния при снижении напряжения прямой последовательности в [7] установлено, что перегрев обмоток АД может наблюдаться при токах статора не превышающих номинальное значение [7]. Дальнейшего исследования требует оценка теплового состояния АД при изменении K_{2U} и $\Delta\psi$ по данным контроля токов в обмотках статора.

Целью данной работы была оценка теплового состояния АД по результатам контроля токов в обмотках статора при несимметрии напряжения сети. Разработка, на основании проведенных исследований, рекомендаций по учету несимметрии питающего напряжения в устройствах защиты АД от тепловых перегрузок.

Расчет токов осуществлялся с помощью метода симметричных составляющих с применением Т-образной схемы замещения [5]. 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. Поэтому анализ осуществлялся для наиболее неблагоприятного значения фазового сдвига $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ [6], который имеет место при одинаковых направлениях симметричных составляющих токов одной из фаз (рис. 1) [6].

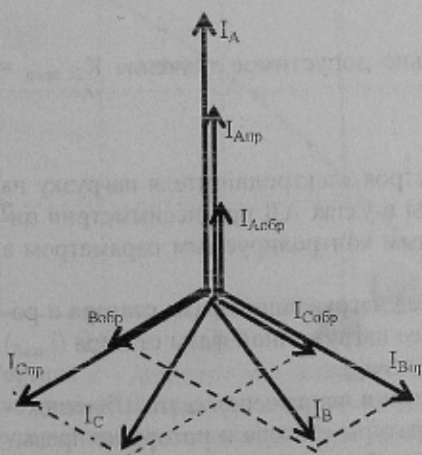


Рисунок 1 – Векторная диаграмма токов в обмотках статора при $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$

Расчет теплового состояния АД выполнялся с помощью системы дифференциальных уравнений, полученных на основании эквивалентной тепловой схемы (ЭТС) [8]. Для этого использовалась ЭТС, разработанная проф. Федоровым М.М., которая позволяет учесть неравномерный нагрев электродвигателя при различных характеристиках несимметрии напряжения сети [8]. 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 [8]: $\Lambda\theta = p$. Здесь $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_8)^T$ – вектор-столбец превышения температур соответствующих узлов над температурой окружающей среды θ_0 ; $\Lambda = (\lambda_{ij})$ – матрица тепловых проводимостей ЭТС АД; $p = (p_1, \dots, p_8)^T$ – вектор потерь мощности в узлах АД.

Результаты расчета, представленные в табл. 1 позволяют оценить распределение температур в обмотках статора ($\theta_{1A}, \theta_{1B}, \theta_{1C}$) при различных значениях коэффициента несимметрии обратной последовательности по току (K_{21}), при номинальной нагрузке на валу АД ($\beta = 1$) и $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$.

Таблица 1 – Превышения температур узлов АД при различных значениях K_{21} и $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$

$K_{21}, \%$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$\theta_{1A}/\theta_{1н}$	1.0	1.04	1.09	1.15	1.21	1.28	1.36	1.45	1.54	1.65	1.77	1.90	2.04
$\theta_{1B}/\theta_{1н}$	1.0	1.006	1.02	1.04	1.06	1.09	1.12	1.16	1.21	1.27	1.33	1.40	1.49
$\theta_{1C}/\theta_{1н}$	1.0	1.006	1.02	1.04	1.06	1.09	1.12	1.16	1.21	1.27	1.33	1.40	1.49

Учитывая, что асинхронные электродвигатели, как правило, проектируются с запасом по температуре обмотки статора не более 20% [8], предельно допустимое значение коэффициента несимметрии обратной последовательности по току с учетом наиболее неблагоприятного значения фазового сдвига ($\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$) составляет (табл. 1) - $K_{21\text{ пред}} = 15\%$.

Оценка несимметрии токов в обмотках статора может осуществляться также на основании сравнения действующего значения тока наиболее нагруженной фазы статора ($I_{\text{наиб}}$) и среднего значения тока статора

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}. \text{ Чем выше несимметрия токов } K_{21}, \text{ тем больше величина } \frac{I_{\text{наиб}}}{I_{\text{ср}}}.$$

Из ВД (рис. 1) для наиболее неблагоприятного сдвига по фазе между симметричными составляющими прямой и обратной последовательности токи в обмотках статора, выраженные через их симметричные составляющие, равны [6]:

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

Тогда при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$ отношение $\frac{I_{\text{наиб}}}{I_{\text{ср}}}$ равно:

$$\frac{I_{\text{наиб}}}{I_{\text{ср}}} = \frac{3 \cdot (I_{1пр} + I_{1обр})}{I_{1пр} + I_{1обр} + 2\sqrt{I_{1пр}^2 + I_{1обр}^2 - I_{1пр}I_{1обр}}}. \quad (2)$$

Разделив числитель и знаменатель на $I_{1пр}$, получим:

$$\frac{I_{\text{наиб}}}{I_{\text{ср}}} = \frac{3 \cdot (K_{21} + 1)}{K_{21} + 1 + 2\sqrt{K_{21}^2 - K_{21} + 1}}. \quad (3)$$

Учитывая, что при эксплуатации с номинальной нагрузкой длительно допустимое значение $K_{21\text{ пред}} = 18\%$, из (3) получим $\frac{I_{\text{наиб}}}{I_{\text{ср}}} = 1.15$.

При несимметрии питающего напряжения во избежание выхода из строя электродвигателя нагрузку на его валу необходимо снижать. Интерес представляют значения температуры в узлах АД при несимметрии питающего напряжения и постоянном токе статора, который является основным контролируемым параметром в процессе эксплуатации АД.

В табл. 2 приведены расчетные установившиеся температуры наиболее нагруженной фазы статора и ротора в абсолютных и относительных единицах при условии, что ток наиболее нагруженной фазы статора ($I_{\text{наиб}}$) не превышает номинальный (I_n) $I_{\text{наиб}} = I_n$, при различных значениях K_{21} и $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$.

Из анализа данных, приведенных в табл. 2, следует, что при несимметрии напряжения сети 10% снижение полезной мощности электродвигателя составляет 12%, при этом температуры статора и ротора не превышают 101°C, 94°C соответственно. При $K_{21} = 20\%$ полезную мощность АД необходимо снизить на 23%, а значения температур не превышают 85°C, 77°C при $K_{21} = 30\%$ - до 60°C, 50°C и т. д. Следовательно, при выполнении условия $I_{\text{наиб}} = I_n$, двигатель недоиспользован по нагреву.

Вместе с тем [7], при снижении напряжения прямой последовательности $U_{пр}$ ниже номинального значения, перегрев обмоток статора и ротора наблюдается даже при симметричном напряжении сети [7].

Таблица 2 – Превышения температуры узлов АД при условии, что $I_{\text{наиб}} = I_n$ и различных значениях K_{21} , $\Delta\psi = \Delta\psi_{\text{max}}$

$U_{\text{нр}}$		Превышения температуры узлов АД θ / θ^*				
		$K_{21} = 0\%$	$K_{21} = 10\%$	$K_{21} = 20\%$	$K_{21} = 30\%$	$K_{21} = 40\%$
U_n	β	1.00	0.88	0.77	0.59	-
	θ_{1A}/θ_{1n}	110.0/1.00	101.0/0.92	84.5/0.77	59.8/0.55	-
	θ_{1B}/θ_{1n}	110.0/1.00	88.3/0.8	68.0/0.62	32.7/0.3	-
	θ_{1C}/θ_{1n}	110.0/1.00	88.3/0.8	68.0/0.62	32.7/0.3	-
	θ_2/θ_{2n}	116.5/1.00	94.0/0.84	76.7/0.70	49.7/0.46	-
$0.9U_n$	β	0.95	0.88	0.77	0.59	-
	θ_{1A}/θ_{1n}	118.0/1.04	104.0/0.94	88.5/0.79	64.8/0.57	-
	θ_{1B}/θ_{1n}	118.0/1.04	89.5/0.81	71.1/0.65	34.1/0.31	-
	θ_{1C}/θ_{1n}	118.0/1.04	89.5/0.81	71.1/0.65	34.1/0.31	-
	θ_2/θ_{2n}	119.0/1.05	96.0/0.85	78.7/0.72	52.7/0.48	-

В табл. 3 показано, каким образом должна изменяться нагрузка β на валу АД, чтобы температура наиболее нагретого узла электродвигателя не превышала допустимую $\theta_{\text{наиб}} = \theta_{\text{доп}}$. При условии, что температура наиболее нагруженного узла не превышает допустимую ($\theta_{\text{наиб}} = \theta_{\text{доп}}$) фиксировалось также распределение токов в обмотках статора АД, средний ток статора ($I_{\text{ср}}$) и коэффициент несимметрии токов обратной последовательности в обмотках статора (K_{21}).

В качестве примера на рис. 3 представлена зависимость величины $\frac{I_{\text{наиб}}}{I_{\text{ср}}}$ от среднего значения тока статора ($I_{\text{ср}}$) при условии, что $\theta_{\text{наиб}} = \theta_{\text{доп}}$ для наиболее неблагоприятного значения фазового сдвига ($\Delta\psi = \Delta\psi_{\text{max}}$).

Таблица 3 – Нагрузка на валу АД (β) и относительные значения токов в обмотках АД при различных значениях K_{21} , при условии, что $\theta_{\text{наиб}} = \theta_{\text{доп}}$ и $\Delta\psi = \Delta\psi_{\text{max}}$

$K_{21}, \%$	0	10	20	30	40	50
β	1.00	0.97	0.95	0.88	0.78	0.51
I_{1A}/I_{1n}	1.0	1.06	1.12	1.19	1.26	1.29
I_{1B}/I_{1n}	1.0	0.95	0.91	0.83	0.78	0.72
I_{1C}/I_{1n}	1.0	0.95	0.91	0.83	0.78	0.72
$I_{\text{ср}}/I_{1n}$	1.0	0.98	0.97	0.95	0.94	0.91

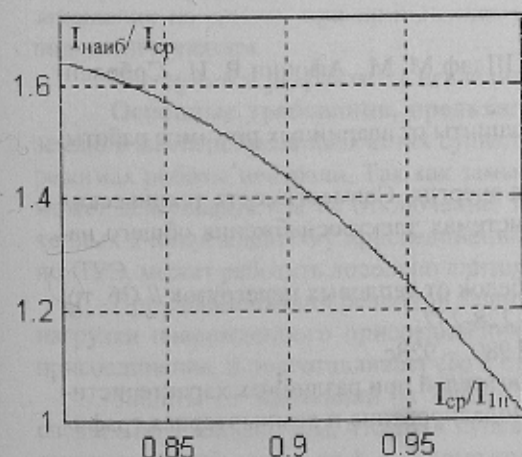


Рисунок 2 – Зависимость величины $I_{\text{наиб}}/I_{\text{ср}}$ от среднего значения тока статора ($I_{\text{ср}}$) при условии, что температура наиболее нагретого узла не превышает допустимую при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\text{max}}$

Из анализа результатов, представленных в табл. 3 и на рис. 2 следует, что при отсутствии перегрева обмоток, относительные значения токов отдельных фаз статора при несимметрии могут превышать номинальные значения. Например, при $K_{21} = 20\%$ среднее значение тока статора снизилось до $0.97 I_{1n}$, а относительное значение тока наиболее нагруженной фазы статора составило - $1.12 I_{1n}$. При $K_{21} = 50\%$ среднее значение тока статора снизилось до $0.91 I_{1n}$, а относительное значение тока наиболее нагруженной фазы статора составило - $1.29 I_{1n}$ и т.д.

Результаты оценки несимметрии токов в обмотках статора по величине $\frac{I_{\text{наиб}}}{I_{\text{ср}}}$ могут быть использованы в устройства защиты от тепловых перегрузок и несимметричных режимов работы. Принципиальная схема узла несимметрии, выполненная по аналоговому принципу представлена на рис. 3.

Предложенный алгоритм работы узла несимметрии (рис. 3) не позволяет исключить перегрев обмоток ротора, связанный со снижением напряжения прямой последовательности; перегрев обмоток, обусловленный неисправностью вентилятора и пр.

Данная схема может быть использована, как один из узлов комбинированного устройства защиты от тепловых перегрузок и несимметричных режимов работы.

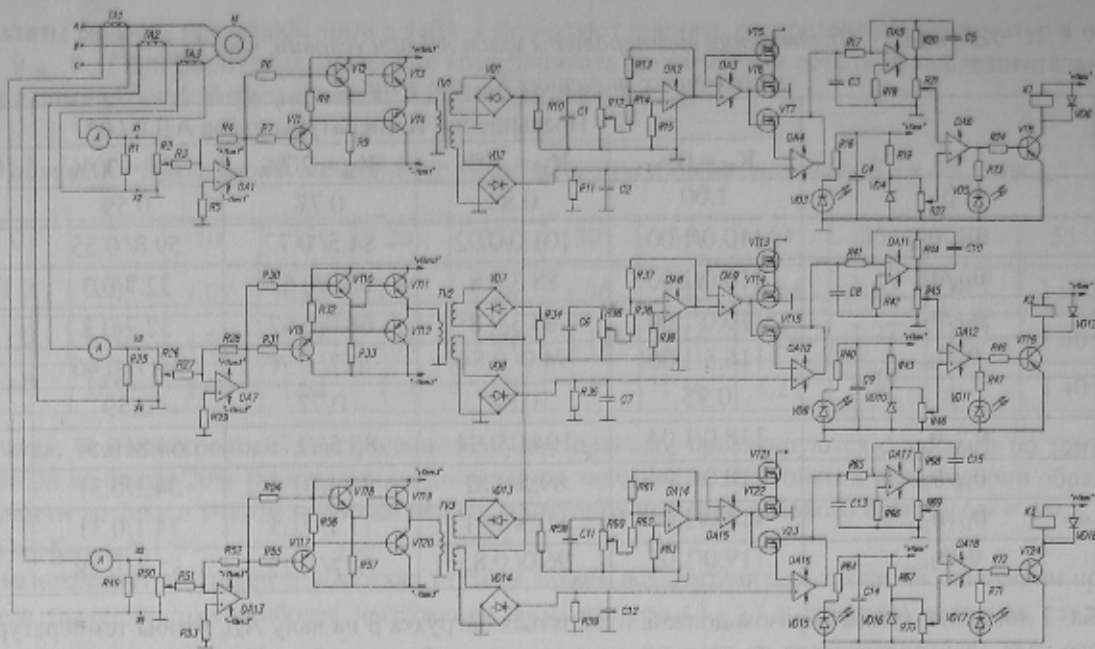


Рисунок 3 – Узел несимметрии устройства защиты от тепловых перегрузок УЗТН -5м

Выводы. По результатам исследований:

- обосновано, что при номинальной нагрузке на валу АД предельно допустимое значение несимметрии тока обратной последовательности статора ($K_{21 \text{ пред}}$) при наиболее неблагоприятном значении фазового сдвига ($\Delta\psi$): $K_{21 \text{ пред}} = 15\%$;

- установлены допустимые значения $K_{21 \text{ пред}}$ при снижении нагрузки на валу АД;

- выявлено, что при выполнении условия $I_{\text{наиб}} = I_n$, двигатель недоиспользован по нагреву;

- предложено, выполнять оценку несимметрии токов в обмотках статора по величине отношения действующего значения тока наиболее нагруженной фазы статора и среднего значения тока статора: $\frac{I_{\text{наиб}}}{I_{\text{ср}}}$. Установлено, предельно допустимое значение с учетом наиболее неблагоприятного значения фазового сдвига при номинальной нагрузке: $\frac{I_{\text{наиб}}}{I_{\text{ср}}} = 1.15$. Получена зависимость $\frac{I_{\text{наиб}}}{I_{\text{ср}}} = f(I_{\text{ср}})$ при условии, что температура наиболее нагретого узла не превышает допустимую.

Результаты исследований могут быть использованы в устройствах защиты от тепловых перегрузок при несимметрии питающего напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И., Соболенская Е. А. - М.: Энергоиздат, 1982. - 504с.
2. Сорокин М.А. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Способы защиты от аварийных режимов работы. // Новости электротехники. - 2005. - № 4 (34).
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. Защита асинхронных двигателей проходческих лебедок от тепловых перегрузок // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. горно-электромеханическая. – Донецк - 1999. - Вып. 7. - С. 228-232.
5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928с.
6. Пинчук О.Г. Моделирование токов и температур асинхронных двигателей при различных характеристиках несимметрии сети: методические подходы. // Матеріали ІІ МНТК «Моделирование и компьютерная графика». – Донецьк. – 10-12 октября, 2007. – С. 347-353, CD-ROM.
7. Федоров М.М., Денник В.Ф., Алексеев Е.Р. Особенности тепловых процессов в асинхронных двигателях при аномальных режимах работы // Електротехнічні та електромеханічні системи. - Львів - 2000. - №403. - С. 170-174.
8. Федоров М.М., Денник В.Ф., Корошенко А.В. Исследование распределения температур узлов асинхронного двигателя при несимметрии питающих напряжений // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. електротехніка і енергетика. – Донецк - 1999. - Вып. 4. - С. 138-141.
9. Копылов И.П., Клюков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. -3-е изд. испр. и доп. - М.: Высшая школа, 2002. - 757с.