

## ДИАГНОСТИКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ РАБОЧЕГО РЕЖИМА

Асинхронный электропривод получил широкое применение во многих отраслях народного хозяйства, благодаря простоте производства и эксплуатации. Это подтверждается тем, что асинхронным электроприводом потребляется до 40 % электроэнергии, производимой в мире. Однако оптимальному использованию асинхронных электродвигателей препятствует их высокая повреждаемость (ежегодно повреждаются 20-25 % от общего количества установленных электродвигателей). Это приводит к нарушению непрерывности технологических процессов с последующим браком продукции, затратам на восстановление и ремонт электродвигателей, а также на восстановление нормальных технологических процессов производства.

Процесс автоматизации управления технологическими процессами путем использования диагностирования технического состояния электродвигателей в рабочих режимах позволяет до минимума снизить ущерб от этих последствий за счет раннего обнаружения зарождающихся дефектов.

Использование методов и средств контроля и анализа текущего технического состояния также позволяет внедрить технологию обслуживания электродвигателей «по состоянию», суть которой заключается в том, что обслуживание и ремонт производятся в зависимости от реального текущего технического состояния механизма, контролируемого в процессе эксплуатации без каких-либо разборок и ревизий на базе измерений соответствующих параметров. При этом затраты на техническое обслуживание электродвигателей снижаются на 50-75 % по сравнению с обслуживанием «по регламенту» (система планово-предупредительных ремонтов) [1].

Анализ существующих методов технической диагностики электродвигателей показывает, что существуют два направления их развития. К первому направлению относятся методы, осуществляемые при проведении профилактических испытаний и ремонтов (т.е. на неработающих электродвигателях) и позволяющие выявлять практически все возможные виды повреждений. Ко второму направлению относятся экспресс-методы, используемые на работающих электродвигателях, но направленные на выявление одного определенного вида дефектов.

Известно, что наиболее часто повреждаются обмотки статора и ротора АД, для диагностирования которых предложено ряд методов. Так в работе [2] для диагностирования обмоток ротора короткозамкнутого АД используется контроль пускового тока статора асинхронного электродвигателя, в работах [3,4] оценка технического состояния обмоток электродвигателя осуществляется по величине третьей гармонической составляющей тока статора, в работе [5,6] диагностирование стержней короткозамкнутого ротора асинхронных электродвигателей производится с использованием пульсаций обобщенного вектора тока статора. К недостаткам указанных методов можно отнести следующее: погрешности диагностирования при наличии пульсаций и гармонических составляющих в питающем напряжении, а также трудности, связанные с оценкой технического состояния электродвигателя с использованием одного из перечисленных критериев.

Целью данной работы является разработка метода диагностики технического состояния обмоток статора и ротора асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором по результатам измерения параметров рабочего режима (фазные токи и напряжения электродвигателя, потребляемая им мощность, частота вращения), не имеющего указанных выше недостатков.

На основании анализа результатов математического моделирования и экспериментальных исследований режимов работы асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором при наличии дефектов обмоток статора и ротора предложено оценку технического состояния выполнять с использованием симметричных составляющих токов и напряжений статора, а также потребляемой активной мощности и угла наклона механической характеристики электродвигателя в области рабочих скольжений. Установлено, что при появлении дефектов в обмотках двигателя в токах статора, скольжении и активной мощности появляются периодические пульсации. Симметричные составляющие прямой и обратной последовательностей находятся по данным измерений фазных величин. На основании контроля пульсаций в огибающей тока статора представляется возможность определить скольжение асинхронного электродвигателя.

При проведении обследования на работающих двигателях выполняется осциллографирование фазных токов и фазных напряжений секции при помощи цифрового устройства регистрации параметров рабочего режима, выполненного на базе ПЭВМ. Подключение токовых входов устройства регистрации выполняется в соответствующих ячейках выключателей к токовым клеммам.

При цифровой регистрации токов удовлетворительная точность имеет место при частотах их фиксации в  $(20 \div 30)$  раз больше частоты сети  $f_1$ . Время контроля должно быть не менее

$$t_{\text{контроля}} \geq \frac{k_3}{s_{\text{ном}} \cdot \frac{P}{P_{\text{ном}}}}, \text{ сек.},$$

где  $k_s = 1,5 \div 2,5$  – коэффициент запаса;

$s_{ном}$  – номинальное скольжение асинхронного электродвигателя, %;

$P_{ном}$ ,  $P$  – значения потребляемой электродвигателем активной мощности соответственно номинальное и определяемое по результатам контроля.

Алгоритм обработки параметров рабочего режима имеет следующую последовательность.

1. Производится расчет периода  $T_1$  и частоты  $f_1$  питающего напряжения, а также начальных фаз токов и напряжений.

2. Определение амплитуды фазных токов в каждый момент времени их фиксации выполняется на основе определения среднеквадратического значения тока для количества дискретных точек, соответствующих периоду сигнала номинальной частоты и взятых слева и справа от текущей  $i$ -той точки:

$$I_{mi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=-10}^{10} i_i^2}{\sum_{i=-10}^{10} \sin^2(2\pi \cdot f_1 \cdot t_i + \varphi_0)}}. \quad (1)$$

3. Для каждого момента времени фиксации мгновенных значений фазных токов электродвигателя определяются вектора фазных токов:

$$\bar{I}_i = I_{mi} \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t_i + \varphi_0) + jI_{mi} \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t_i + \varphi_0).$$

4. По значениям векторов фазных токов электродвигателя, рассчитываются симметричные составляющие прямой  $\bar{I}_{1i}$  и обратной  $\bar{I}_{2i}$  последовательностей для каждого момента времени  $t_i$ :

$$\bar{I}_{1i} = \frac{1}{3}(\bar{I}_{ai} + a\bar{I}_{bi} + a^2\bar{I}_{ci}); \quad \bar{I}_{2i} = \frac{1}{3}(\bar{I}_{ai} + a^2\bar{I}_{bi} + a\bar{I}_{ci}),$$

где  $a = e^{j2\pi/3}$  – фазный множитель.

5. Амплитуды составляющих тока прямой  $I_{1m}$  и обратной  $I_{2m}$  последовательностей за полное время контроля определяются по выражениям:

$$I_{1m} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n i_{1i}^2}; \quad I_{2m} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n i_{2i}^2},$$

где  $i_{1i} = \text{real}(\bar{I}_{1i})$ ,  $i_{2i} = \text{real}(\bar{I}_{2i})$  – мгновенные значения составляющих тока соответственно прямой и обратной последовательностей.

6. Рассчитывается величина коэффициента несимметрии фазных токов электродвигателя

$$k_i = \frac{I_{1m} - I_{2m}}{I_{1m}}.$$

7. Величина потребляемой электродвигателем активной мощности  $p$  определяется на основании контроля фазных токов и фазных или линейных напряжений по выражению:

$$p = i_a \cdot u_a + i_b \cdot u_b + i_c \cdot u_c \quad \text{или} \quad p = i_a \cdot u_{ab} + i_c \cdot u_{cb}.$$

8. Для определения величины скольжения асинхронного электродвигателя используется кривая изменения амплитуды фазного тока во времени  $I_{mi}(t)$ , найденная по выражению (1) и смещенная вниз до пересечения с осью времени  $t$ :

$$I_{xi} = I_{mi} - I_{m.c.p.},$$

где  $I_{m.c.p.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{mi}$  – среднее значение амплитуды фазного тока электродвигателя.

Находится период колебаний  $t_{кол}$  амплитуды фазного тока и рассчитывается величина скольжения  $s$  электродвигателя по выражению:

$$s = \frac{1}{t_{кол}}, \%. \quad (2)$$

9. Определяется критерий наклона характеристики  $k_p$ , характеризующий крутизну механической характеристики асинхронного электродвигателя в области рабочих скольжений. Так как при наличии оборванных стержней короткозамкнутого ротора скольжение  $s$  двигателя увеличивается при той же величине нагрузки, то указанное отношение будет уменьшаться по сравнению с его значением для исправного двигателя. Такой же характер изменения крутизны указанной характеристики будет иметь место и при понижении напряжения. Поэтому вводится коррекция предлагаемого критерия с учетом квадрата отношения номинального напряжения и напряжения статора в опыте. В относительных единицах выражение для критерия наклона характеристики имеет вид

$$k_p = \left(\frac{P}{P_{ном}}\right) \cdot \left(\frac{s}{s_{ном}}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{U_{ном}}{U}\right)^2,$$

где  $s, U$  – определяемые по результатам эксперимента значения соответственно скольжения и напряжения статора;

$U_{ном}$  – номинальное напряжение статора.

10. В качестве комплексного критерия диагностирования асинхронного электродвигателя предложен коэффициент его исправного состояния, который определяется как

$$k_d = \frac{c_i k_i + c_p k_p}{c_i + c_p},$$

где  $c_i, c_p$  – весовые коэффициенты, равные  $1 \div 3$ , которые в дальнейшем могут быть уточнены на основе опыта эксплуатации.

Для исправного двигателя  $k_d=1$ . Отклонение этого параметра в сторону понижения от единицы свидетельствует о наличии дефектов обмоток асинхронного электродвигателя.

Заключение о месте возникновения (обмотка статора или ротора) и виде возникшего дефекта (обрыв ветвей параллельной обмотки статора и стержней обмотки короткозамкнутого ротора, витковое замыкание, нарушение контактов, паяных или сварных соединений в обмотках статора и ротора) дается на основании анализа совокупности изменения величины критерия диагностирования и параметров рабочего режима электродвигателя, а также по частоте тока обратной последовательности (см. табл. 1).

Используя методики, приведенные в работах [7,8], на основании контроля мгновенных значений фазных токов и напряжений статора электродвигателя можно выявлять дефекты механической части (в том числе, эксцентриситет).

Таблица 1 - Связь диагностируемых дефектов и их симптомов

Дефект	Симптом	Частота тока ОП $f_2$	Ток в поврежденной фазе $I_{повр}$	Ток в здоровой фазе $I_{здор}$
Витковое замыкание в фазе обмотки статора		$f_1$	$\geq 1,1I_{ном}$	$\geq 1,05I_{ном}$
			$I_{повр} > I_{здор}$	
Обрыв одной параллельной ветви обмотки статора	$m^*=1$	$f_1$	0	$0,86I_{ном}$
	$m=2$		$0,6I_{ном}$	$0,92I_{ном}$
	$m=3$		$0,75I_{ном}$	$0,94I_{ном}$
	$m=4$		$0,82I_{ном}$	$0,96I_{ном}$
Обрыв одного стержня КЗР		$f_1(1-2s)$	Пульсации тока статора	
Дефекты механической части		$\beta + \gamma$	Пульсации тока статора	
Эксцентриситет			$\cos \varphi \uparrow$ (на х.х.)	

\*  $m$  – количество параллельных ветвей обмотки статора электродвигателя.

Возникновение составляющей тока обратной последовательности, имеющей частоту сети, вызвано либо несимметрией обмоток статора, либо несимметрией питающего напряжения. Таким образом, для достоверного диагностирования дефектов обмотки статора требуется четко выявлять причину возникновения такой несимметрии параметров рабочего режима электродвигателя (токов и напряжений).

Разработанный метод учета влияния несимметрии питающего напряжения на результаты диагностики основан на определении фазных сопротивлений электродвигателя и имеет следующую последовательность:

- на основе контроля мгновенных значений фазных токов и напряжений электродвигателя определяются действующие значения токов и напряжений фаз

$$I = \sqrt{\frac{1}{n_k - 1} \sum_{n=1}^{n_k} (i(nT))^2}; \quad U = \sqrt{\frac{1}{n_k - 1} \sum_{n=1}^{n_k} (u(nT))^2},$$

где  $i(nT), u(nT)$  – мгновенные значения соответственно фазных токов и напряжений;

$n_k$  – количество выборок сигнала за полное время контроля;

- рассчитывается величина сопротивлений фаз обмотки статора электродвигателя

$$Z_a = \frac{U_a}{I_a}; \quad Z_b = \frac{U_b}{I_b}; \quad Z_c = \frac{U_c}{I_c};$$

- на основании сравнения величины фазных сопротивлений электродвигателя делается заключение о причинах возникновения несимметрии параметров рабочего режима. Так, если  $Z_a = Z_b = Z_c$ , то причина несимметрии – питающая сеть. Если же сопротивления отличаются по величине, то причина несимметрии – несимметрия обмоток статора.

Результаты исследования влияния несимметрии питающего напряжения и несимметрии обмотки статора (при обрыве параллельных ветвей обмотки статора) на величину фазных сопротивлений электродвигателя приведены в табл.2.

Таблица 2 - Результаты исследования влияния несимметрии питающего напряжения и несимметрии обмотки статора электродвигателя на величину фазных сопротивлений электродвигателя

Причина несимметрии	Фазные токи, о.е.			Фазные напряжения, о.е.			Фазные сопротивления, о.е.		
	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$U_a$	$U_b$	$U_c$	$Z_a$	$Z_b$	$Z_c$
$k_{2u}^* = 0; m^{**} = 2;$ $n_a = n_b = n_c^{***}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$k_{2u} = 0;$ $m = 2; n_a = 1;$ $n_b = n_c = 0$	0,6	0,917	0,917	1,2	0,917	0,917	2	1	1
$k_{2u} = 5; m = 2;$ $n_a = n_b = n_c$	0,961	0,776	1,03	0,961	0,776	1,03	1	1	1
$k_{2u} = 5; m = 2;$ $n_a = 1;$ $n_b = n_c = 0$	0,577	0,741	0,874	1,15	0,741	0,874	2	1	1

\*  $k_{2u}$  – коэффициент несимметрии питающего напряжения;

\*\*  $m$  – количество параллельных ветвей обмотки статора электродвигателя;

\*\*\*  $n_a, n_b, n_c$  – число оборванных параллельных ветвей обмотки статора соответственно в фазах А, В и С.

#### Выводы

Предложен метод непрерывного контроля состояния обмоток статора и ротора асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором по данным измерений фазных токов и напряжений. Полученные данные используются для определения по разработанному алгоритму токов прямой и обратной последовательностей, скольжения, потребляемой активной мощности и угла наклона механической характеристики электродвигателя. Эти параметры положены в основу комплексного критерия оценки технического состояния обмоток асинхронного электродвигателя, который позволяет повысить точность диагностирования по сравнению с известными методами.

#### Литература

1. <http://stmnik.narod.ru>.
2. Брюханов Г.А., Князев С.А. Метод и устройство для диагностики состояния роторных обмоток асинхронных электродвигателей // Электрические станции. – 1986. - № 2. – С. 44-45.
3. Гашимов М.А., Аскеров Н.А. Выявление неисправности стержней ротора асинхронных электродвигателей // Электрические станции. – 1984. - № 8. - С. 60-66.
4. Гашимов М.А., Гаджиев Г.А., Мирзоева С.М. Диагностирование неисправностей обмотки статора электрических машин // Электрические станции. – 1998. - № 11. - С. 30-35.
5. Гармаш В.С. Метод контроля исправности стержней ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя // Энергетика. - 1990. - № 10. - С. 50-52.
6. Сивокобыленко В.Ф., Нури Абделбассет. Диагностика состояния короткозамкнутых роторов асинхронных машин // Электричество. – 1997. - № 3. - С. 25-26.
7. Булычев А.В., Ванин В.К. Метод контроля состояния механической части асинхронного электродвигателя // Электротехника. – 1997. - № 10. – С.5-9.
8. H. Meshgin, J. Milimonfared, Effects of air-gap eccentricity on the power factor of squirrel cage induction machines. International conference on electrical machines (ICEM-2002), Old St. Jan Conference Center, Brugge, Belgium, Conference Record.