

## Определение симметричных составляющих параметров рабочего режима для диагностики электродвигателей

Гребченко Н.В.,

Донецкий государственный технический университет  
Ул. Артема 58, Донецк, 83000, Украина

**Аннотация:** Предложен алгоритм диагностирования электродвигателей, основанный на контроле симметричных составляющих параметров рабочего режима. Изложенные в нем принципы прошли предварительную проверку в лабораторных условиях и в условиях собственных нужд ТЭС. Алгоритм диагностирования позволяет выявлять большую часть возможных повреждений электродвигателей.

**Ключевые слова:** электродвигатель, система диагностирования, дефект, симметричные составляющие, ток обратной последовательности, частота, испытания

В последнее время возросла актуальность проблемы диагностирования электродвигателей (ЭД) промышленных предприятий и собственных нужд (с.н.) электрических станций. В основном это обусловлено истечением срока эксплуатации у большого количества ЭД и утяжелением условий их эксплуатации. При этом непрерывное диагностирование ЭД позволяет наиболее существенно повысить надежность работы технологических процессов. Период диагностирования может составлять от нескольких секунд до нескольких суток.

В настоящее время отсутствует целостная теория диагностирования ЭД. Вместе с тем имеется достаточно много разработок, позволяющих выявлять практически все возможные виды повреждений ЭД. С другой стороны, вполне очевидно, что может оказаться экономически нецелесообразным выполнение разработки по выявлению тех видов повреждений, которые происходят очень редко.

При выполнении данной работы ставилась цель – создание такой системы диагностирования ЭД, которая позволяла бы выявлять наиболее вероятные повреждения и не требовала бы установки дополнительных датчиков и оборудования, а для ее работы не требовалось бы создания специальных режимов работы (например, пуск, останов и др.).

Одним из основных путей разработки систем диагностирования до сих пор был путь получения таких изменений диагностических параметров, которые надежно превышали бы значения этих параметров при отсутствии дефекта и с учетом

Полковниченко Д.В.

Донецкий государственный технический университет  
ул. Артема 58, Донецк, 83000, Украина

возможных помех. Например, в [1] для диагностирования предлагается использование режима пуска. Более удобным в эксплуатации является диагностирование в рабочем режиме, т.е. без отключения электрооборудования.

Анализ данных о повреждаемости ЭД с.н. ТЭС [2,3] показывает, что основными повреждениями являются:

- в обмотке статора – повреждение или ухудшение изоляции, витковые замыкания, обрыв параллельных ветвей;
- в короткозамкнутом роторе – обрыв стержней;
- износ подшипников.

Все эти дефекты приводят к появлению соответствующей электрической и магнитной несимметрии. В случае ухудшения изоляции одной из фаз обмотки статора нарушается симметрия сопротивлений изоляции фаз обмотки по отношению к земле. Поэтому данный дефект сопровождается увеличением токов нулевой последовательности. Витковые замыкания, обрыв параллельных ветвей обмотки статора, обрыв стержней короткозамкнутого ротора приводят к появлению несимметрии фазных токов ЭД, т.е. к увеличению тока обратной последовательности (ОП)  $I_2$ . При этом частота тока ОП  $f_2$  зависит от места дефекта (например, статорная или роторная обмотка). В качестве диагностического параметра удобно использовать коэффициент ОП по току, характеризующий относительное содержание тока ОП в токе статора и определяемый по выражению

$$K_{2I} = \frac{I_{2\text{действ}}}{I_{1\text{действ}}} 100\%,$$

где  $I_{2\text{действ}}$  – действующее значение тока ОП, А;  
 $I_{1\text{действ}}$  – действующее значение тока прямой последовательности, А.

Эти зависимости положены в основу разрабатываемой системы диагностирования ЭД.

Для проверки правильности этих принципов проведены экспериментальные исследования установившихся режимов работы ЭД при витковых замыканиях в обмотке статора и обрыве стержней обмотки ротора. При проведении лабораторных

исследований выполнено цифровое осциллографирование фазных токов и напряжений ЭД, а также частоты вращения АД, с частотой дискретизации 1000 Гц. В устройстве фиксации в каждом канале использовались десятиразрядные АЦП типа Ф-7077/1.

Исследование витковых замыканий проведено на опытном ЭД с выведенными в фазе А отпайками, что позволяет имитировать замыкания витков. В табл.1 приведены результаты экспериментальных исследований при различном количестве замкнувшихся витков.

ТАБЛИЦА 1  
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ВИТКОВЫХ ЗАМКНАНИЙ

Количество замкнутых витков, %	Ток замыкания $I_{з\text{амк.}}, A$	Ток в фазе А, $I_A, A$	$I_2, A$	$K_{2I}, \%$
0	0	4,30	0,21	5,0
7	32,4	4,53	0,48	10,9
9	49,6	5,00	0,84	18,2
13	66,5	6,35	1,53	28,7

Частота тока ОП  $f_2$ , вызванная замыканием витков в опытах, равна частоте сети. Повышенное значение величины тока ОП неповрежденного опытного ЭД вызвана частично тем, что выполненные в фазе отпайки привели к фазной несимметрии статора, а также несимметрией питающего напряжения равной 3,7 %. Замыкание небольшого количества витков приводит к незначительному увеличению тока в поврежденной фазе, поэтому в таком случае релейная защита оказывается к нему не чувствительна. Однако, при этом в замкнувшихся витках протекает значительный ток, что может привести к развитию повреждений. Проведенный анализ результатов экспериментальных исследований показал, что по изменению величины тока ОП можно надежно выявлять витковые замыкания даже небольшого числа витков. Выявление витковых замыканий требует высокого быстродействия системы диагностирования, и даже отключения ЭД, т.е. выполнения функции защиты.

Для оценки возможности выявления обрывов стержней обмотки ротора асинхронных ЭД в рабочем режиме проведена серия лабораторных исследований. Для этого использовался опытный ЭД, ротор которого модернизирован с целью обеспечения возможности имитации обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора. В опытах изменялась величина нагрузки на валу ЭД, а также число оборванных стержней обмотки ротора. На рис.1 приведены зависимости коэффициента ОП по току от количества оборванных стержней ротора при различной нагрузке на валу ЭД.

Частота тока ОП в проведенных опытах изменяется и является функцией скольжения ЭД. Из рис.1 видно, что если на основании результатов опытов принять естественную несимметрию опытного двигателя при его номинальной нагрузке равной 0,5 % (ток ОП двигателя при отсутствии явных дефектов обмотки ротора) и коэффициент надежности отстройки

равным 2, то обрыв одного стержня можно выявить по увеличению тока ОП только при нагрузке двигателя не менее 50 % от номинальной. При отсутствии нагрузки по этому параметру можно выявить обрыв не менее трех стержней. В связи с этим для выявления обрывов стержней ротора при изменяющейся нагрузке ЭД критическое значение диагностического параметра необходимо автоматически изменять в зависимости от величины полного тока. Анализ результатов расчетов для различных коэффициентов загрузки (0,5÷1,0) показали, что величина коэффициента ОП по току  $K_{2I}$  примерно прямо пропорциональна коэффициенту загрузки ЭД  $K_{загр}$

$$K_{2I доп.} \cong K_{2I доп. ном.} \cdot K_{загр} \cdot$$

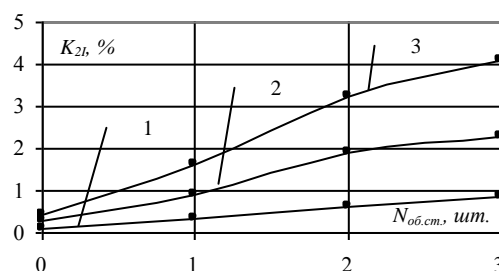


Рис.1 - Зависимость коэффициента ОП по току от количества оборванных стержней ротора  $N_{об.ст.}$  при различной величине нагрузки на валу ЭД  $P_{нагр}$ : 1 -  $P_{нагр}=0$ ; 2 -  $P_{нагр}=0,5 P_{ном}$ ; 3 -  $P_{нагр}=P_{ном}$

На основании изложенных соображений алгоритм диагностирования ЭД в рабочем режиме может быть представлен в виде следующей последовательности операций.

1. На основании результатов математического моделирования или экспериментальных исследований определяются критические значения диагностических параметров (величина и частота тока ОП).

При определении критического значения  $I_{2 доп.}$  принимается значение тока ОП, который возникает при обрыве одного стержня. Для ориентировочных расчетов удобно использовать коэффициент ОП по току, который для случая обрыва одного стержня [4]

$$k_{2I} = \frac{1}{Z_2 / p - 2},$$

где  $Z_2$  - число пазов ротора;  
 $p$  - число пар полюсов ЭД.

Коэффициент ОП по току  $K_{2I}$  при известном количестве замкнувшихся витков и конкретном ЭД можно определить по формуле [5]

$$K_{2I} = m \frac{I_{х.х.} + I_{н.н.}}{I_{ном}},$$

где  $I_{х.х.}$  - ток холостого хода;  
 $I_{н.н.}$  - номинальный пусковой ток;  
 $I_{ном}$  - номинальный ток двигателя;  
 $m$  - коэффициент, определяемый по типовой кривой [5].

2. Производится цифровое осциллографирование фазных токов, а также напряжений секции с.н. Для этого измерительные цепи подключаются к токовым клеммам во вторичных цепях трансформаторов тока, соответствующих выключателей. Для уменьшения погрешности, обусловленной преобразованием АЦП, может быть использован блок нормализации сигнала на входе АЦП.

3. Цифровая фильтрация токов и напряжений. Начало развития повреждения сопровождается незначительным изменением диагностических параметров. Поэтому для повышения чувствительности системы диагностики и обеспечения достоверности диагноза требуется отстройка от помех, вызванных электромагнитными наводками в условиях системы с.н., шумами АЦП и т.д. Величина составляющих помехи во входном сигнале иногда может превышать величину полезного сигнала. Выбор полосы пропускания цифрового фильтра определяется частотой полезного сигнала. Повреждения обмотки статора (витковые замыкания, обрыв параллельных ветвей) приводят к появлению тока ОП с частотой сети  $f_1$ . Ток ОП, обусловленный повреждением стержней ротора, имеет частоту [6]

$$f_2 = f_1(1 - 2S), \quad (1)$$

где  $S$  – скольжение ЭД.

В качестве примера, показывающего эффективность фильтрации контролируемых сигналов, на рис.2 приведены осциллограммы тока ОП на входе и на выходе цифрового фильтра. Результаты получены при осциллографировании рабочего режима ЭД привода ПЭН типа 4АЗМ-8000. Здесь коэффициент ОП по току на входе фильтра равен 5,6 %, а на его выходе 0,4 %. Эта величина вызвана естественной несимметрией ЭД и несимметрией питающего напряжения.

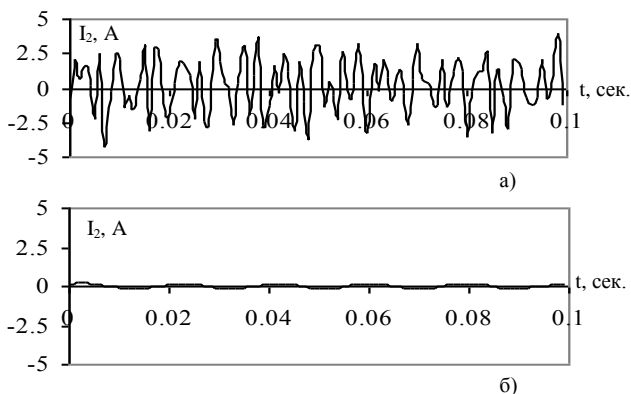


Рис.2 – Осциллограммы тока ОП на входе (а) и на выходе (б) цифрового фильтра, полученные для рабочего режима ЭД привода ПЭН типа 4АЗМ-8000

4. Определение тока ОП  $\bar{I}_2$ . Для получения достоверных результатов диагностирования необходимы удовлетворяющие требуемой точности алгоритмы и программы расчета диагностических параметров по полученным в ходе прямых измерений параметрам режима ЭД.

В соответствии с методом симметричных составляющих ток ОП определяется по выражению:

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + a^2 \bar{I}_b + a \bar{I}_c), \quad (2)$$

где  $\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$  – комплексные действующие значения фазных токов;

$$a = e^{j2\pi/3} - \text{фазный множитель.}$$

Так как трансформаторы тока на присоединениях с.н. в основном устанавливаются только в двух фазах А и С, то для сети с изолированной нейтралью ток фазы В определяется из условия

$$\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = 0.$$

Аналогично определяются составляющие прямой последовательности.

Однако, при подаче на вход АЦП синусоидального сигнала на его выходе через равные промежутки времени формируются цифровые коды, которые соответствуют текущему значению входного сигнала.

Поэтому невозможно вычислять  $\bar{I}_2$ , используя непосредственно выражение (2).

Наибольшую точность определения векторов токов и напряжений фаз  $\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c, \bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$  обеспечивает расчет их по двум выборкам соответствующих мгновенных значений  $i_a(t), i_b(t), i_c(t), u_a(t), u_b(t)$  и  $u_c(t)$  [7], который и используется в алгоритме диагностирования. Цифровое преобразование, обеспечивающее получение вектора по двум выборкам мгновенных значений синусоидальной величины имеет вид:

$$\underline{U}(nT) = \frac{1}{\sin \omega_0 T} \left[ u(nT) e^{j\omega_0 T} - u(nT - T) \right], \quad (3)$$

где  $T$  – период дискретизации;  $n$  – целое число;

$\omega_0$  – угловая основная частота.

Для использования выражения (3) в алгоритмах диагностики и обработки экспериментальных данных в них определяется частота  $\omega_0$  входных сигналов. Для обеспечения требуемой точности измерение  $\omega_0$  выполняется путем подсчета числа периодов дискретизации в течение заданного количества периодов сигнала (например, 50), а затем определяется длительность времени. При этом время уточняется с учетом поправки момента времени перехода сигнала через ноль.

5. Определение составляющих тока ОП основной  $f_1$  и отличной от нее частоты  $f_2$ . Для этого используется преобразование Фурье с учетом реальной частоты сети. Наличие тока ОП с частотой сети свидетельствует о повреждениях обмотки статора, а ток ОП с частотой  $f_2$ , являющейся функцией скольжения (1), свидетельствует о повреждениях стержней ротора.

6. Выполняется сравнение расчетных величин составляющих тока ОП с их критическими значениями для данного ЭД. При этом учитывается несимметрия питающего напряжения. Превышение амплитудой какой-либо составляющей тока ОП

критической величины является признаком соответствующего дефекта.

При дальнейшем развитии системы диагностирования контроль состояния механической части ЭД будет производиться путем выделения составляющих тока статора с частотами, отличными от частоты сети, и определения уровня этих составляющих [8].

В соответствии с выше приведенной методикой проведено обследование ЭД с.н. блока № 3 Зуевской ТЭС. Некоторые результаты обследования приведены в табл.2 и на рис.3.

ТАБЛИЦА 2  
ЗНАЧЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В РАБОЧЕМ РЕЖИМЕ ЭД С.Н.

ЭД	$I_2, A$	$K_{2f}, \%$	$f_1, Гц$	$f_2, Гц$
Дымосос	1,9	1,1	49,53	49,53
ДРГ	0,9	1,9	49,26	49,25
ШБМ	3,0	2,25	49,61	49,61

Осциллограммы токов ОП для обследованных ЭД, полученных в результате обработки фазных рабочих токов, приведены на рис.3.

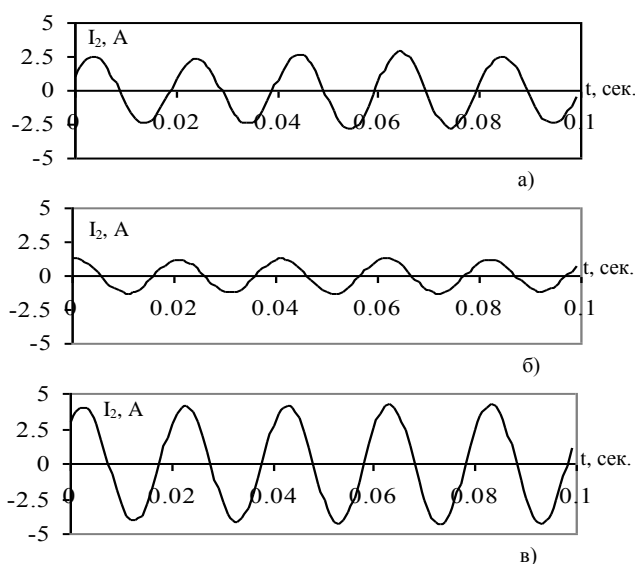


Рис.3 - Осциллограммы тока ОП: а – ЭД привода дымососа; б – ЭД привода ДРГ; в – ЭД привода ШБМ

Приведенные результаты показывают, что ЭД находятся в нормальном техническом состоянии. Повышенная несимметрия статорной обмотки ЭД привода ШБМ вызвана его частыми ремонтами.

#### Выводы

1. Изменение величины и частоты симметричных составляющих токов ЭД позволяет выявлять наиболее часто возникающие дефекты ЭД (ухудшение изоляции обмотки статора, витковые замыкания, обрывы стержней обмотки ротора). Поэтому на основании контроля этих изменений может выполняться эффективная система

диагностирования ЭД в рабочем режиме, без отключения ЭД.

2. Для выявления дефектов на ранней стадии требуется повышение чувствительности контроля диагностических параметров. Обеспечение требуемой чувствительности контроля может быть выполнено за счет учета помех, несимметрии питающего напряжения, изначальной несимметрии ЭД, а также высокой точности расчета мгновенных значений симметричных составляющих токов и напряжений.

3. Лабораторные испытания и обследование ЭД с.н. в условиях ТЭС не выявили недостатков в разработанной системе диагностирования. На основании этого можно считать, что предложенный алгоритм диагностирования ЭД является работоспособным.

#### Литература

1. Брюханов Г.А., Князев С.А. Метод и устройство диагностики состояния роторных обмоток асинхронных электродвигателей // Электрические станции. – 1986. - №2. – С. 44-45.
2. Собственные нужды тепловых электростанций./ Э.М.Аббасова, Ю.М.Голоднов, В.А.Зильберман, А.Г.Мурзаков; под ред. Ю.М.Голоднова.- М: Энергоатомиздат, 1991.- 272 с.
3. Лихачев Ф.А. Перенапряжения в сетях собственных нужд // Электрические станции. – 1983. - № 10. – С.69-73.
4. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования. - Киев: Техника, 1983. - 200 с.
5. Гимоян Г.Г. Релейная защита горных электроустановок. – М.: Недра, 1978. - 349 с.
6. Гашимов М.А., Аскеров Н.А. Выявление неисправности стержней ротора асинхронных электродвигателей // Электрические станции. – 1984. - № 8. - С. 60-66.
7. Шнеерсон Э.М. Дистанционные защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
8. Булычев А.В., Ванин В.К. Метод контроля состояния механической части асинхронного электродвигателя // Электротехника. – 1997. - № 10. – С. 5-9.

#### Сведения об авторах

**Гребченко Николай Васильевич** – доцент кафедры «Электрические станции» Донецкого государственного технического университета. Окончил Донецкий политехнический институт в 1974г. Кандидат технических наук. Основное направление научной деятельности – разработка новых принципов релейной защиты и автоматики подстанций с двигательной нагрузкой.

**Полковниченко Дмитрий Викторович** – ассистент кафедры «Электрические станции» Донецкого государственного технического университета. Окончил Донецкий государственный технический университет в 1995 г. Основное направление научной деятельности – разработка методов и средств диагностики электродвигателей.

# DEFINITION OF SYMMETRICAL COMPONENT PARAMETERS OF AN OPERATING DUTY FOR DIAGNOSTICS OF ELECTRIC MOTORS

N. Grebchenko, D. Polkovnichenko  
Donetsk State Technical University  
Artema 58, Donetsk, 83000, Ukraine

**The summary:** The algorithm of diagnosing of electric motors based on monitoring of symmetrical component parameters of an operating duty is offered. The principles stated it, have passed a pre-check in laboratory conditions and in conditions of own needs of thermal power stations. The algorithm of diagnosing allows revealing a large part of possible damages of electric motors.