

МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ 6 - 10 кВ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ В РАБОЧЕМ РЕЖИМЕ

Полковниченко Д.В.

Донецкий национальный технический университет

dima_p@elf.dgtu.donetsk.ua

The method of diagnosing of availability index of product of asynchronous electric motors 6-10 kV, permitting in an operating duty is developed to reveal most frequently meeting kinds of defects (breakaways of parallel branches of a winding of stator's and rods of a curl, interturn short-circuit, defects of a mechanical part).

Разработанный метод предназначен для диагностирования повреждений асинхронных электродвигателей (АД) 6-10 кВ с короткозамкнутым ротором (КЗР) в рабочем режиме. Метод применим для АД с КЗР, работающих в режимах S_1 (продолжительный), S_2 (кратковременный) и S_3 (повторно-кратковременный), т.к. эти режимы характеризуются неизменностью нагрузки и потерь [1]. Метод позволяет выявлять повреждения АД, вызывающие несимметрию фазных токов статора. К таким повреждениям относятся: витковые замыкания в обмотке статора, обрыв параллельных ветвей обмотки статора, обрыв стержней КЗР, нарушение контактов, паяных или сварных соединений в АД, дефекты механической части АД (выплавка баббита в подшипниках скольжения и чрезмерный износ подшипников качения, эксцентриситет). Согласно данным, приведенных в [2], с помощью разработанного метода можно выявить до 70 % возможных повреждений электродвигателей собственных нужд ТЭС.

Алгоритм основан на том, что появление дефекта электродвигателя сопровождается изменением одного из параметров режима свыше допустимого или происходит незначительное изменение нескольких параметров режима, но их взаимные изменения не соответствуют изменению рабочего режима, т.е. являются несовместными [3].

Связь диагностируемых дефектов и их симптомов приведена в табл.1.

Таблица 1 - Связь диагностируемых дефектов и их симптомов

Симптом		$k_{2i}, \%$	Частота тока ОП f_2	Ток в поврежденной фазе $I_{повр}$	Ток в здоровой фазе $I_{здор}$
Дефект					
Витковое замыкание в фазе обмотки статора		≥ 3	f_1	$\geq 1,1I_{ном}$	$\geq 1,05I_{ном}$
				$I_{повр} > I_{здор}$	
Обрыв одной параллельной ветви обмотки статора	$m=1$	100	f_1	0	$0,86I_{ном}$
	$m=2$	25		$0,6I_{ном}$	$0,92I_{ном}$
	$m=3$	14		$0,75I_{ном}$	$0,94I_{ном}$
	$m=4$	10		$0,82I_{ном}$	$0,96I_{ном}$
Обрыв стержня КЗР		≥ 3	$f_1(1-2s)$	Пульсации тока статора	
Дефекты подшипников		≥ 3	$\beta + \gamma$	Пульсации тока статора	
Эксцентриситет				$\cos \varphi \uparrow$	

Метод диагностирования повреждений АД с КЗР заключается в выполнении следующих операций.

1. На работающем двигателе производится осциллографирование мгновенных значений фазных токов двигателя и фазных напряжений секции.
2. Рассчитываются действующие значения токов прямой I_1 и обратной I_2 последовательностей АД, действующие значения напряжений прямой U_1 и обратной U_2 последовательностей.
3. Определяются коэффициенты по току k_{2i} и по напряжению k_{2u} , а также критерий наклона механической характеристики k_p и критерий исправности КЗР k_o :

$$k_{2i} = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100\%,$$

где I_1, I_2 – действующие или амплитудные значения токов соответственно прямой и обратной последовательности;

$$k_{2u} = \frac{U_{2(1)}}{U_{ном}} \cdot 100\%,$$

где $U_{2(1)}$ – действующее значение напряжения обратной последовательности первой гармоники трехфазной системы напряжений;

$U_{ном}$ – номинальное значение междуфазного напряжения;

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

где $P_{ном}$, $s_{ном}$, $U_{ном}$ – номинальные значения соответственно потребляемой АД активной мощности, скольжения и напряжения статора АД;

P , s , U – определяемые по результатам контроля параметров рабочего режима соответственно потребляемая АД активная мощность, скольжение и напряжение статора АД;

$$k_o = \sqrt{\frac{k_i^2 + k_p^2}{2}},$$

где $k_i = \frac{I_1 - I_2}{I_1} = 1 - k_{2i}$ – коэффициент несимметрии токов.

4. Производится отстройка коэффициента обратной последовательности по току k_{2i} от несимметрии питающего напряжения (по результатам контроля напряжений на секции) согласно [4] и конструктивной несимметрии электродвигателя (по результатам плановых испытаний).

5. По результатам эксплуатации и испытаний АД с КЗР на математической модели электродвигателя определяются пороговые значения диагностических параметров ($k_{2i,дон}$, $k_{р,дон}$, $k_{o,дон}$), соответствующие возникновению дефектов.

6. На основании анализа совокупности изменения диагностических параметров, по величине соотношения их пороговых и расчетных значений, а также по характеру изменения параметров рабочего режима АД дается заключение о техническом состоянии электродвигателя.

7. Определяется частота тока обратной последовательности f_2 . По значению частоты тока обратной последовательности и на основании анализа характера изменения параметров рабочего режима АД делается вывод о виде дефекта.

Раскроем подробнее пункты приведенной выше методики диагностирования технического состояния АД с КЗР.

1. При проведении обследования на работающем блоке и работающих двигателях выполняется осциллографирование фазных токов АД и фазных напряжений секции при помощи цифрового устройства регистрации параметров режима, выполненного на базе ПЭВМ. В зависимости от наличия трансформаторов тока выполняется запись токов фаз A и C или A , B и C .

Подключение токовых входов устройства регистрации выполняется в соответствующих ячейках выключателей к токовым клеммам, которые в нормальном режиме зашунтированы винтами.

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

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

где $k_3 = 1,5 \div 2,5$ – коэффициент запаса.

2. Так как в основном на присоединениях электродвигателей устанавливаются трансформаторы тока только в двух фазах, то расчет токов прямой и обратной последовательностей можно производить по токам двух фаз (\bar{I}_a, \bar{I}_c). Обмотка статора АД соединяется по схеме «звезда» без заземления общей точки, поэтому пути для протекания токов нулевой последовательности нет и по полученным экспериментальным данным токи прямой I_1 и обратной I_2 последовательностей и напряжения прямой U_1 и обратной U_2 последовательностей рассчитываются по известным выражениям:

$$\bar{I}_1 = (\bar{I}_a + a\bar{I}_b + a^2\bar{I}_c)/3 = [\bar{I}_a(1-a) + a\bar{I}_c(a-1)]/3,$$

$$\bar{I}_2 = (\bar{I}_a + a^2\bar{I}_b + a\bar{I}_c)/3 = [\bar{I}_a(1-a^2) + a\bar{I}_c(1-a)]/3,$$

$$\bar{U}_1 = (\bar{U}_a + a\bar{U}_b + a^2\bar{U}_c)/3,$$

$$\bar{U}_2 = (\bar{U}_a + a^2\bar{U}_b + a\bar{U}_c)/3 \text{ или } \bar{U}_2 = (\bar{U}_{ab} - a^2\bar{U}_{bc})/3,$$

где $\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c, \bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c, \bar{U}_{ab}, \bar{U}_{bc}$ – векторные значения токов и напряжений;

$a = e^{j120}$, $a^2 = e^{-j120}$ – фазные множители.

Для определения величины критерия наклона механической характеристики k_p выполняется расчет величины потребляемой АД активной мощности по следующему выражению:

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

Скольжение АД при наличии датчиков частоты вращения определяется по выражению

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

где n_1 - частота вращения поля статора АД;

n_2 - частота вращения ротора АД.

Так как на двигателях, используемых на промышленных объектах, датчики частоты вращения обычно не устанавливаются, скольжение определяется с использованием зависимости амплитуды фазного тока АД по методике, приведенной в [5].

Критерий k_p , а также комплексный критерий исправности КЗР k_d используется для уточнения диагноза о повреждении стержней КЗР, поставленного по величине и частоте тока обратной последовательности, а также по характеру изменения фазных токов.

3. Для уменьшения погрешности измерения диагностических параметров и обеспечения достоверности оценки технического состояния АД принимаются следующие меры:

- для ослабления мешающего действия помех применяются защитно-предохранительные меры (проверяется и улучшается состояние контактов, для защиты от магнитных и электрических полей используется соответственно магнитное и электростатическое экранирование, выставляются «0» на АЦП);

- для уменьшения погрешности, вносимой АЦП, применяется нормализация сигнала перед его обработкой в АЦП. С помощью математического моделирования АЦП была рассчитана и выбрана трехуровневая нормализация сигнала, обеспечивающая минимальную погрешность измерений;

- по величине тока рабочего режима АД производится выбор параметров шунтов для более полного использования динамического диапазона АЦП.

4. Пороговые значения диагностических параметров для каждого обследуемого электродвигателя определяется по результатам математического моделирования. Исходными данными для математического моделирования режимов работы АД являются результаты эксплуатации и испытаний АД с КЗР, а также его конструктивные данные.

Пороговые значения коэффициента обратной последовательности по току k_{2i} можно также определить, воспользовавшись обобщенными зависимостями [6].

5. Заключение о техническом состоянии электродвигателя дается на основании анализа совокупности изменения диагностических параметров и параметров рабочего режима электродвигателя, а также сравниваются расчетные и пороговые значения диагностических параметров. Проводимый анализ диагностических параметров и параметров рабочего режима позволяет установить причину их изменения: возникновение повреждения или изменение режима работы электродвигателя.

6. По величине частоты тока обратной последовательности f_2 , учитывая величину относительного содержания тока обратной последовательности в токе статора k_{2i} , делается предположение о возможном виде повреждения.

Так, если $f_2 \approx f_1$,

где f_1 – частота питающего напряжения,

то произошло повреждение обмотки статора. По величине k_{2i} и характеру изменения параметров рабочего режима АД (см. табл.1) делается заключение о возникшем виде повреждения (обрыв ветвей параллельной обмотки статора АД, витковое замыкание, нарушение контактов, паяных или сварных соединений в обмотках статора АД).

Если $f_2 \approx f_1(1-2s)$,

где s – скольжение АД,

то произошло повреждение обмотки ротора. По величине k_{2i} дается заключение о возникшем виде повреждения (обрыв стержней КЗР, нарушение контактов, паяных или сварных соединений в роторе АД).

О наличии дефектов механической части АД диагноз ставится по величине и частоте составляющих тока статора, полученных после отстройки от тока основной гармоники. Частота этих составляющих зависит от конструкции АД (числа пар полюсов p) и определяется по выражениям [7].

По изменению коэффициента мощности в сторону увеличения при работе АД с КЗР на холостом ходу ставится диагноз о возрастании уровня эксцентриситета [8,9].

На рис.1-3 приведены осциллограммы фазного тока статора АД i , амплитуды фазного тока статора I_{m0} и обобщенного тока статора i_{s0} , смещенных до пересечения с осью времени t , соответствующие наличию различных видов дефектов и их совокупности.

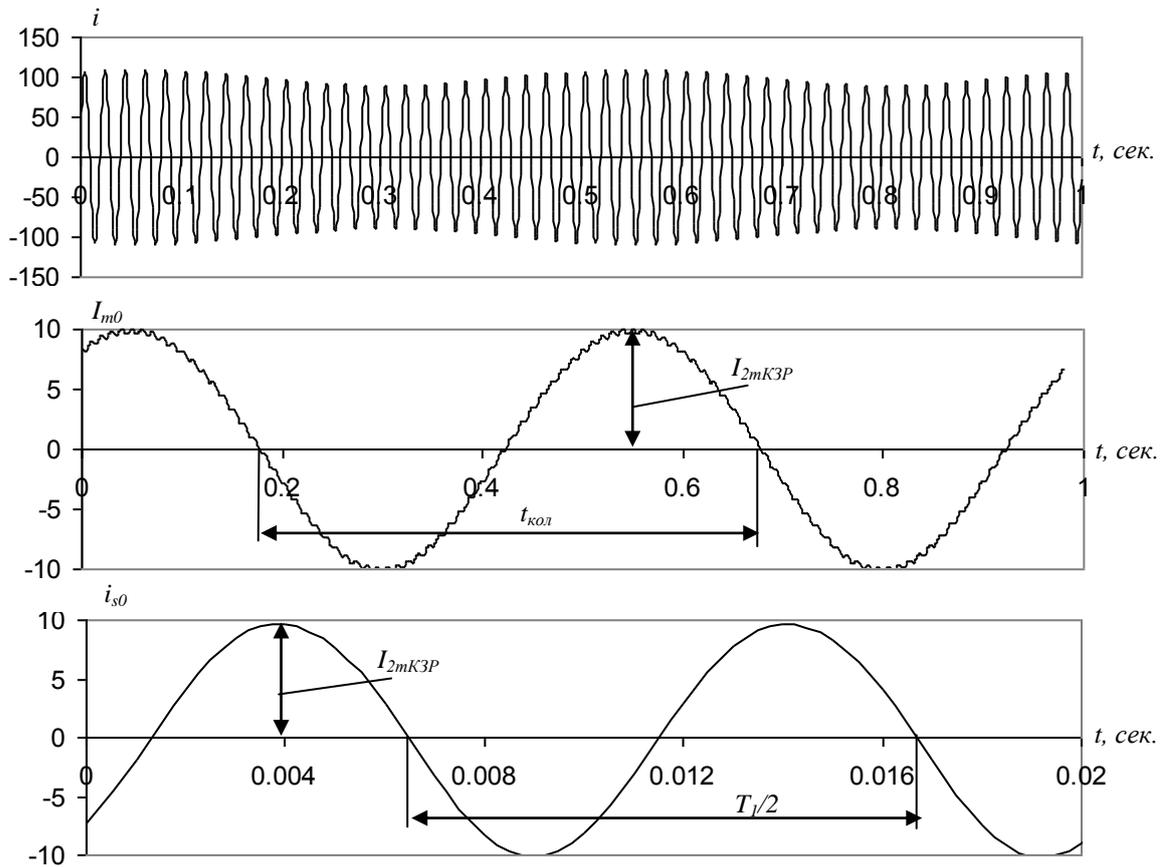


Рисунок 1 - Осциллограммы, соответствующие наличию дефектов КЗР

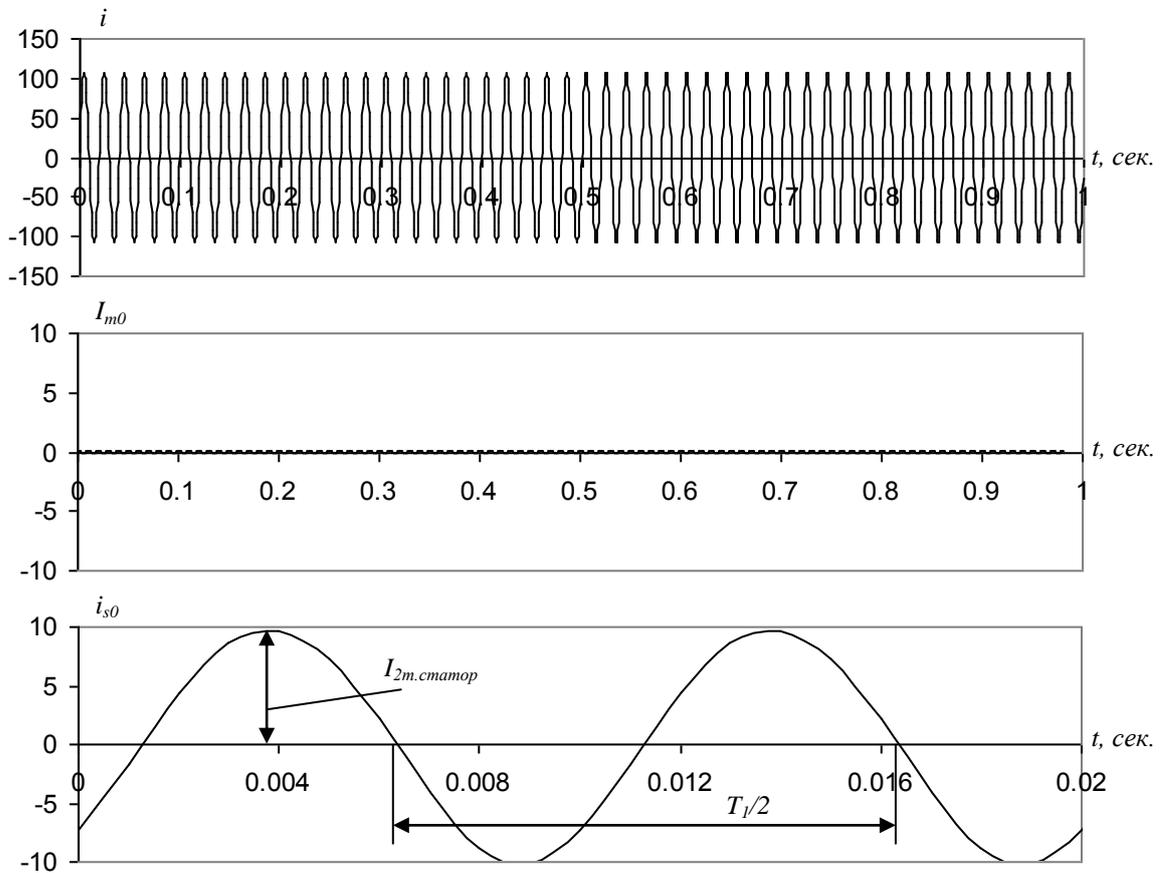


Рисунок 2 - Осциллограммы, соответствующие наличию дефектов обмотки статора

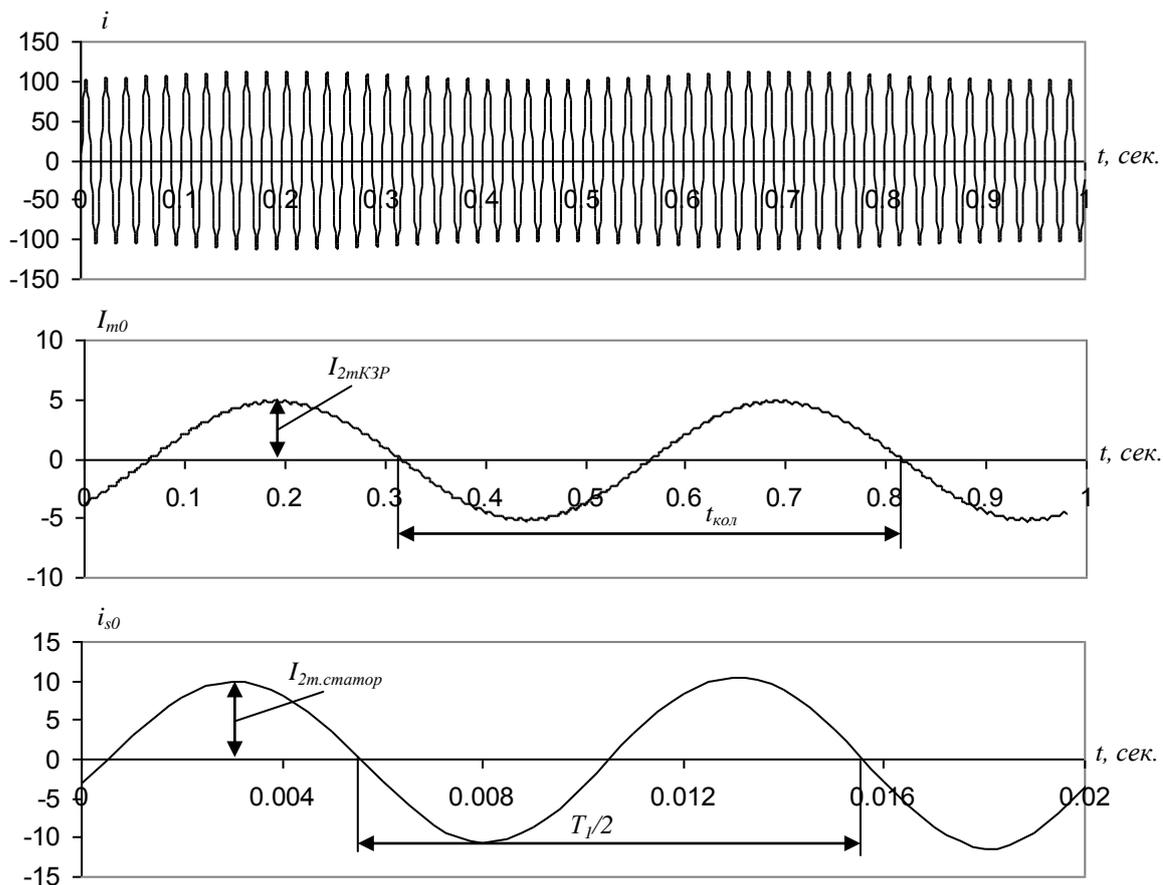


Рисунок 3 - Осциллограммы, соответствующие наличию дефектов обмотки статора и КЗР

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общей ред. И.П. Копылова и Б.К. Клопова. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - Т.1. - 456 с.
2. Глебов И.А., Мамиконянц Л.Г. Электрические машины. "Обзор докладов международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ)". - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 104 с.
3. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Экспериментальные исследования установившихся режимов работы асинхронных электродвигателей при наличии в них дефектов // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 17. - Донецк: ДонГТУ. - 2000. - С. 110-114.
4. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Обеспечение достоверности оценки технического состояния при диагностировании асинхронных электродвигателей // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 21. - Донецк: ДонГТУ. - 2000. - С. 153-157.
5. Сивокобыленко В.Ф., Полковниченко Д.В. Диагностика состояния ротора асинхронного электродвигателя на основе контроля параметров рабочего режима // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 41. - Донецк: ДонГТУ. - 2002. - С.41-45.
6. Полковниченко Д.В. Математическое моделирование установившихся режимов работы асинхронных электродвигателей при наличии в них дефектов // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 28. - Донецк: ДонГТУ. - 2001. - С.100-102.
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.
9. Рогозин Г.Г., Мироненко И.А. Влияние неравномерности воздушного зазора на электромагнитные параметры и переходные процессы ротора при отключении асинхронных двигателей // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 17. - Донецк: ДонГТУ. - 2000. - С. 158-164.