

АНАЛИЗ СПЕКТРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗАЗОРЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИИ ОБМОТКИ РОТОРА

СКОРОБОГАТОВ А.А., ассист.

Представлены результаты исследования степени влияния параметров как самого асинхронного двигателя, так и режима его работы на форму диагностического сигнала, определяющего состояние каждого стержня короткозамкнутой обмотки ротора. Предложены новые диагностические признаки для контроля состояния обмотки ротора асинхронных двигателей.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, обмотка ротора, магнитное поле.

THE ANALYSIS OF MAGNETIC FIELD SPECTRUM IN ASYNCHRONOUS ENGINE SPLIT AT ROTOR WINDING DAMAGE

SKOROBOGATOV A.A., assist.

The article concerns the results of parameter influence research of both asynchronous engine itself and its operation mode on the diagnostic signal form determining every rod condition of short-circuit rotor winding. The new diagnostics signs for the control of asynchronous engine rotor winding condition are suggested.

Key words: asynchronous engine, rotor winding, magnetic field.

Надежность работы электростанций во многом определяется надежностью работы вспомогательных механизмов собственных нужд, приводимых во вращение, главным образом, асинхронными электродвигателями (АД).

Практика эксплуатации АД показывает, что обрыв одного или нескольких стержней обмотки ротора (ОР) является наиболее часто встречающейся и трудно поддающейся контролю неисправностью. Последствиями обрыва стержней могут быть механическое повреждение обмотки статора, ухудшение пусковых и рабочих характеристик машины и др.

Разработка эффективных способов диагностического контроля технического состояния ОР в условиях функционирования АД позволит своевременно определить возникающие неисправности, предотвратить внезапные отказы в работе и нарушения ответственных технологических процессов на электростанциях и в узлах нагрузки.

Одна из главных трудностей в решении этой актуальной задачи заключается в том, что пока недостаточно исследована данная неисправность электрических машин на предмет получения диагностирующей информации и не определены специальные диагностические признаки (ДП), особенно из числа высших гармонических составляющих в машине, на основе которых можно было бы разработать эффективные способы и средства контроля.

Существуют способы регистрации обрыва стержней короткозамкнутого ротора, основанные на измерении магнитного потока рассеяния, образующегося вокруг стержней ротора, перемещении двух подковообразных электромагнитов со стержня на стержень по окружности бочки ротора, измерении силы тока в статоре в процессе медленного проворачивания ротора при питании обмотки статора пониженным напряжением, сравнении уровня сигналов вибраций корпуса и др.[1].

К сожалению, существующие методы контроля этой неисправности оказываются малоэффективными, требуют или специального испытания, или специального пускового режима, и поэтому не нашли широкого практического применения. Главным

же их недостатком является непригодность для применения в условиях нормальных режимов работы машины.

Поскольку данная неисправность оказывает определенное влияние на гармонические составляющие электромагнитного процесса функционирования машины, представляет интерес специальное исследование этого влияния для получения диагностирующей информации.

В статье представлены результаты исследования влияния обрыва стержней ротора на электромагнитные процессы, в особенности на его гармонические составляющие, и анализа возможности использования их в качестве ДП наличия оборванных стержней в ОР в условиях работы. При этом особое внимание уделено анализу энергетического спектра диагностического сигнала (ДС), определяющего состояние каждого стержня.

В [2] предложено магнитное поле реальной ОР разделить на два поля: одно из них генерируется токами исправной ОР, а другое – токами фиктивной ОР (ФОР). В качестве ДС в [2] принята зависимость тангенциальной составляющей магнитной индукции ФОР от времени – $B_{\alpha \text{ ФОР}}(t)$ или производная радиальной составляющей магнитной индукции ФОР по времени – $\frac{\partial B_{r \text{ ФОР}}(t)}{\partial t}$, а в качестве

ДП – появление пика в указанных зависимостях в месте расположения поврежденного проводника.

Так как формы сигналов $B_{\alpha \text{ ФОР}}(t)$ и $\frac{\partial B_{r \text{ ФОР}}(t)}{\partial t}$ пропорциональны друг другу, в дальнейшем рассматривается только один из них, а именно $B_{\alpha \text{ ФОР}}(t)$. График сигнала $B_{\alpha \text{ ФОР}}(t)$, полученный путем математического моделирования [2] для реальной ОР, имеющей число стержней ротора, равное $Z_p = 19$, и содержащей два оборванных стержня с номерами № = 3 и № = 7 при скольжении $s = 0,05$, приведен на рис. 1.

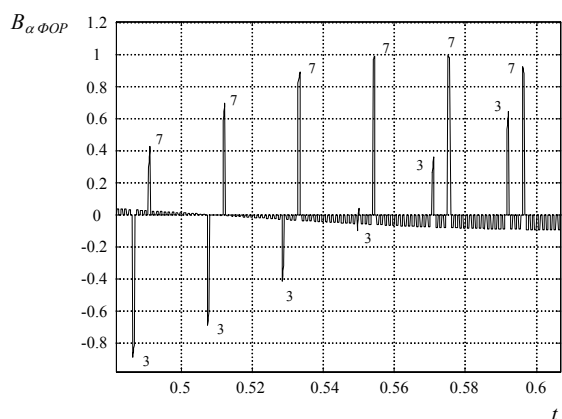


Рис. 1. Зависимость $B_{\alpha \text{ ФОР}}(t)$ при обрыве двух стержней: №3 и №7 ($Z_p = 19, \rho = 1$)

На рис. 2 и 3 представлен энергетический спектр ДС – $W_{\text{ФОР}}(f)$; указаны параметры, которые определяют состав частот спектра: $\Delta f^{(v)}$ – разница между частотами v -го порядка, обусловленная влиянием колебаний с частотой скольжения токов по оборванным стержням в ФОР; $\Delta f^{(v,v+1)}$ – разница между частотами v -го и $v + 1$ -го порядка.

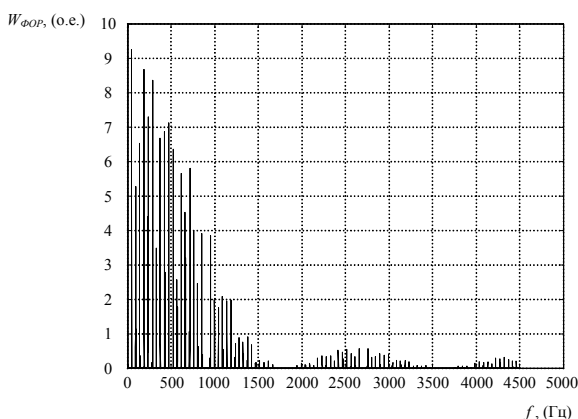


Рис. 2. Энергетический спектр ДС $\frac{\partial B_p \text{ ФОР}(t)}{\partial t}$ на отрезке частот от 0 до 5000 Гц

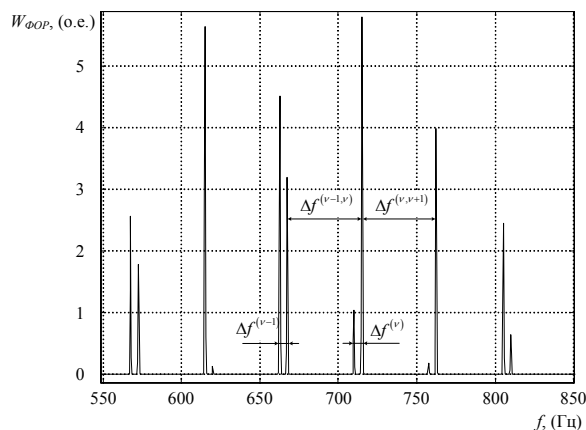


Рис. 3. Энергетический спектр ДС $\frac{\partial B_p \text{ ФОР}(t)}{\partial t}$ на отрезке частот от 550 до 850 Гц

Для определения значений частот энергетического спектра магнитного поля от ФОР проведено исследование степени влияния следующих параметров на параметры $\Delta f^{(v)}$ и $\Delta f^{(v,v+1)}$: ρ – числа пар полюсов; Z_p – числа стержней; $\frac{b_n}{t_z}$ – отношения ширины паза b_n к ширине зубцового деления t_z ; s – скольжения; $Z_{об}$ – числа оборванных стержней; номеров оборванных стержней.

Степень влияния определялась путём изменения величин одного из параметров при постоянных значениях оставшихся. Диапазоны изменения параметров приведены ниже и обусловлены их предельными величинами на реальных объектах:

$20 < Z_p < 180$ с шагом 20;

$1 < \rho < 8$ с шагом 1;

$0,01 < s < 0,1$ с шагом 0,01;

$0,1 < \frac{b_n}{t_z} < 0,9$ с шагом 0,1;

$1 < Z_{об} < 0,2 \cdot Z_p$ с шагом 1 и с последовательным изменением номеров оборванных стержней.

Результаты экспериментов при изменении параметров $\rho, \frac{b_n}{t_z}, s$ и Z_p для $Z_{об} = 1$ приведены в табл. 1–4.

Таблица 1. Результаты расчета параметров $\Delta f^{(v,v+1)}$ и $\Delta f^{(v)}$ при изменении параметра ρ

$\frac{b_n}{t_z}$	Z_p	s	ρ	$\Delta f^{(v,v+1)}$, Гц	$\Delta f^{(v)}$, Гц
0,5	20	0,05	1	47,5	5
			2	23,75	5
			3	15,83	5
			4	11,87	5
			5	9,5	5
			6	7,91	5
			7	6,78	5
			8	5,93	5

Таблица 2. Результаты расчета параметров $\Delta f^{(v,v+1)}$ и $\Delta f^{(v)}$ при изменении параметра $\frac{b_n}{t_z}$

ρ	Z_p	s	$\frac{b_n}{t_z}$	$\Delta f^{(v,v+1)}$, Гц	$\Delta f^{(v)}$, Гц
2	20	0,05	0,1	23,75	5
			0,2	23,75	5
			0,3	23,75	5
			0,4	23,75	5
			0,5	23,75	5
			0,6	23,75	5
			0,7	23,75	5
			0,8	23,75	5
			0,9	23,75	5

Таблица 3. Результаты расчета параметров $\Delta f^{(v,v+1)}$ и $\Delta f^{(v)}$ при изменении параметра s

p	Z_p	$\frac{b_n}{t_z}$	s	$\Delta f^{(v,v+1)}$, Гц	$\Delta f^{(v)}$, Гц
2	20	0,5	0,01	24,75	1
			0,02	24,5	2
			0,03	24,25	3
			0,04	24	4
			0,05	23,75	5
			0,06	23,5	6
			0,07	23,25	7
			0,08	23	8
			0,09	22,75	9
			0,1	22,5	10

Таблица 4. Результаты расчета параметров $\Delta f^{(v,v+1)}$ и $\Delta f^{(v)}$ при изменении параметра Z_p

$\frac{b_n}{t_z}$	p	s	Z_p	$\Delta f^{(v,v+1)}$, Гц	$\Delta f^{(v)}$, Гц
0,5	2	0,05	20	23,75	5
			40	23,75	5
			60	23,75	5
			80	23,75	5
			100	23,75	5
			120	23,75	5
			140	23,75	5
			160	23,75	5
			180	23,75	5

Анализ полученных данных показал:

1) общая формула, определяющая величины частот энергетического спектра магнитного поля от ФОР при любом числе оборванных стержней и расположении их по отношению друг к другу, имеет вид

$$f_{\text{ФОР}}^{(v)} = f_c \cdot \left(\frac{1-s}{p} \cdot v \pm s \right), \quad v = 1, 2, 3, \dots; \quad (1)$$

2) каждому порядку гармоник энергетического спектра ДС, генерируемого токами ФОР, принадлежат две гармоники, значения которых отличаются на величину $\Delta f^{(v)}$. Этот параметр прямо пропорционален скольжению. От других величин он не зависит. Зависимость $\Delta f^{(v)}(s)$ выглядит следующим образом:

$$\Delta f^{(v)} = 2 \cdot f_c \cdot s, \quad (2)$$

где f_c – частота сети в герцах;

3) разница между частотами соседних порядков $\Delta f^{(v,v+1)}$ определяется двумя параметрами: скольжением и числом пар полюсов. Зависимость $\Delta f^{(v,v+1)}(p)$ выглядит следующим образом:

$$\Delta f^{(v,v+1)} = \frac{f_c}{p}; \quad (3)$$

4) изменение параметра Z_p не приводит к появлению новых составляющих в энергетическом спектре ДС;

5) при $\frac{b_n}{t_z} = 0,5$ энергетический спектр ДС

теряет гармоники порядка $v = k \cdot \frac{Z_p}{p}$. При других

значениях параметра $\frac{b_n}{t_z}$ энергетический спектр ДС

полностью описывается формулой (4);

$$f_{\text{ФОР}}^{(v)} = f_c \cdot \left(\frac{1-s}{p} \cdot v \pm s \right), \quad v \neq k \cdot \frac{Z_p}{p}, \quad v = 1, 2, 3, \dots; \quad (4)$$

6) основная доля энергии сигнала ФОР находится в низкочастотной области спектра. Увеличение скольжения, числа пар полюсов и отношения ширины паза к ширине зубцового деления сдвигают энергетический спектр ДС в область низких частот. Увеличение числа стержней в ОР приводит к обратному эффекту.

Магнитное поле в воздушном зазоре исправного АД хорошо изучено [3]. Его спектр временных гармоник описывается общей формулой вида

$$f_{\text{Испр.АД}} = k \cdot \frac{Z_p}{p} \cdot f_c \cdot (1-s) \pm f_c, \quad (5)$$

при $k = 0, 1, 2, \dots$

Сравнение энергетических спектров магнитного поля от ФОР и магнитного поля в воздушном зазоре исправного АД показало, что первый содержит большее количество гармоник. Спектр магнитного поля от ФОР при удалении из него частот, описываемых формулой (5), имеет вид формулы (4).

На основании этого можно сделать вывод, что при обрыве стержня короткозамкнутой ОР происходят следующие явления:

- резкое увеличение амплитуд временных гармоник внешнего магнитного поля АД, которые описываются формулой (5);

- резкое увеличение амплитуд временных гармоник в токе статора, которые также описываются формулой (5).

Данные явления могут быть использованы в качестве ДП наличия в ОР оборванных стержней.

Заключение

В результате исследования степени влияния параметров как самого АД, так и режима его работы на форму ДС, определяющего состояние каждого стержня короткозамкнутой ОР, получена общая формула, которая позволяет определить величины частот энергетического спектра ДС. На основании этой формулы предложены новые диагностические признаки для контроля состояния ОР АД.

Список литературы

1. Сахновский Н.Л. Испытание и проверка электрического оборудования. – М.: Энергия, 1975.
2. Скоробогатов А.А. Математическая модель магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора, имеющей оборванные стержни // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 5. – М.: Энергоатомиздат, 2004.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. заведений. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

Скоробогатов Андрей Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
ассистент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,
телефон (4932) 26-99-43,
e-mail: kafedra@esde.ispu.ru