

Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора

ВЕЙНРЕБ К.

Представлен метод повышения эффективности обнаружения и однозначной оценки различных видов неисправностей ротора асинхронного двигателя (АД), основанный на изменении характерных признаков спектра тока статора. Учтены гармоники фазного тока и их симметричные составляющие, генерируемые высшими гармониками (в том числе третьей) напряжения питания. Представлены результаты и анализ измерений, проведенных для искусственно заданных случаев повреждений ротора АД малой мощности. Эффективность предлагаемого метода диагностики подтверждает анализ спектра тока статора крупного промышленного электродвигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, спектральный анализ, асимметрия клетки, эксцентриситет ротора

Диагностика состояния асинхронного двигателя (АД) важная практическая задача, поскольку не обнаруженные своевременно нарушения работы отдельных узлов машины, в частности повреждения обмотки ротора или наличие эксцентриситета, могут привести к тяжелым авариям на производстве.

Новые информационные технологии позволяют проводить автоматический мониторинг технического состояния машины и при установке системы оперативной диагностики повысить надежность работы АД. Обзор и классификация применяемых методов диагностики представлены в [1–5]. Особенно быстро развивались методы, основанные на анализе доступных для измерений напряжения питания, тока обмотки статора и магнитного поля.

Влияние эксцентриситета на изменение электромагнитных параметров электродвигателя, в частности повышение амплитуд третьих гармоник фазных напряжений, измеряемых в условиях работы машины, обсуждено в [6]. Расчет цепной модели АД в режиме пуска определяет влияние числа поврежденных стержней на энергетические показатели машины [7].

В [8–10] рассмотрены электромагнитные методы определения эксцентриситета и электрической асимметрии клетки ротора АД, используемые при оперативной диагностике состояния двигателей. Широко распространена диагностика состояния

A method for efficiently detecting and unequivocally estimating various kinds of faults in an induction motor's rotor based on changes in the characteristic features of the stator current spectrum is presented. The harmonic components of phase current and their symmetric components generated by higher harmonics (including the third one) of the supply voltage are taken into account. The results of measurements carried out for artificially specified faults in the rotor of a small-capacity induction motor are presented and their analysis is carried out. The effectiveness of the proposed diagnostic method is confirmed by a spectrum analysis of the stator current of a large industrial electric motor.

Key words: induction motor, spectrum analysis, cage asymmetry, rotor eccentricity

АД, основанная на анализе спектра потребляемого тока [11–13].

Ток статора – весьма удобный сигнал для мониторинга машины без ее остановки: в спектре тока видны все основные признаки нарушения ее внешней и внутренней симметрии. Амплитуды гармоник тока жестко определяются коэффициентами электромагнитных связей между обмотками двигателя, а их частоты связаны с видом дефекта.

В аналитических расчетах переходных и установившихся режимов асинхронной машины с электрической или магнитной асимметрией наиболее часто применяется метод двух реакций или метод симметричных составляющих [14].

В [15–18] представлена математическая модель АД, учитывающая все гармоники, связанные как с пространственным расположением обмоток, так и с видом геометрии воздушного зазора. Там же представлен метод решения уравнений математической модели для установившегося режима работы АД с постоянной частотой вращения, использующий баланс симметричных составляющих гармоник токов обмоток и позволяющий уже на стадии составления системы уравнений качественно определить частоты спектров Фурье токов машины. Разработка универсальных компьютерных программ и создание на их основе образцовых спектров тока статора для комплексной диагностики АД в условиях взаимодействия разных видов дефектов позволяет определить количественные показатели для каждого из повреждений. Сравнение

расчетов и измерений, проведенных для опытного двигателя, подтверждает эффективность принятого метода анализа [18].

На основе результатов исследований, проведенных автором настоящей статьи, представлен эффективный метод обнаружения и определения характера повреждений ротора АД.

Гармоники тока статора. Рассмотрим спектр тока статора трехфазного АД с числом пазов статора N_s и с контурами беличьей клетки ротора общим числом N_r , работающего со скольжением, близким к номинальному. Соединенная в звезду симметричная обмотка статора имеет целое число пазов на полюс и фазу и создает МДС с нечетной кратностью числа пар полюсов p . В симметричных составляющих прямой «1» или обратной «2» последовательности питающих напряжений учтены все нечетные гармоники, особенно третья, относительно основной гармоники с частотой f_0 . Тогда в спектре тока статора среди прочих содержатся следующие гармоники [15–18]: сетевые с частотами, равными частотам гармоник напряжения питания; гармоники с частотами, зависящими от частоты вращения ротора n :

$$f_s = |kf_0 + lf_r|, \quad (1)$$

где $f_r = n/60$ – частота ротора, Гц; n , об/мин; $k = 1, 3, 5, \dots$; $l = \pm 1, \pm 2, \dots$

Для рассматриваемого АД наименьшая разность частот двух гармоник для скольжения s равна

$$Df_s = 2sf_0 = 2f_0 - 2pf_r. \quad (2)$$

Гармоники тока, связанные с числом пазов ротора N_r , так называемые пазовые гармоники SH , имеют частоты:

$$f_{SH} = |kf_0 + lN_r f_r|. \quad (3)$$

Вышеуказанные гармоники характерны для спектра тока двигателя, питаемого несимметричным напряжением или в случае статического эксцентриситета (СЭ) ротора, когда ось его вращения (ось симметрии ротора) перемещена параллельно оси симметрии внутренней расточки статора.

Среди пазовых гармоник особое значение для диагностики, в том числе для правильного определения частоты вращения ротора, имеет основная пазовая гармоника PSH , которая также присутствует в спектре полностью симметричного двигателя. Частота этой гармоники зависит от значения параметра g , равного наименьшему натуральному числу

из множества $\{1, 2, \dots, 2p\}$, для которого остаток деления gN_r на $6p$ принадлежит множеству $\{0, 2p, 4p\}$. Таким образом, имеем три типа двигателя ($t \in \{0, 1, 2\}$), у которых порядок симметричных составляющих (СС) токов статора определяется очередностью нулевой «0», прямой «1» или обратной «2» последовательности в системе уравнений математической модели АД с линейной магнитной цепью [15, 18].

С учетом соединения фаз статора и в зависимости от типа двигателя в спектре тока статора содержатся одна или две PSH с частотами f_{PSH} :

для $t=0$ остаток от деления равен $2p$ и

$$f_{PSH} = |f_0 - gN_r f_r|; \quad (4)$$

для $t=1$ остаток от деления равен 0 и

$$f_{PSH} \in \{|f_0 - gN_r f_r|, |f_0 + gN_r f_r|\}; \quad (5)$$

для $t=2$ остаток от деления равен $4p$ и

$$f_{PSH} = |f_0 + gN_r f_r|. \quad (6)$$

В табл. 1 для выбранных конструкций короткозамкнутых АД приведены значения частот гармоник PSH и SEH , характерные для случаев работы двигателя в условиях статического эксцентриситета или асимметрии напряжений питания; частоты вычислены по (3)–(6) для заданных N_r , p , $f_0 = 50$ Гц, переменных n , s .

Таблица 1

Заданные значения			Значения частот	
N_r	t	g	f_{PSH} , Гц	f_{SEH} , Гц
$p = 1, 2940 \leq n \leq 3000$ (об/мин), $0,02 \leq s \leq 0$				
28	2	1	1422-1450	1322-1350
34	2	1	1716-1750	1616-1650
36	1	1	1714-1750, 1814-1850	Нет
38	0	1	1812-1850	1912-1950
40	2	1	2010-2050	1910-1950
$p = 2, 1470 \leq n \leq 1500$ (об/мин), $0,02 \leq s \leq 0$				
50	0	2	2400-2450	1175-1200, 1275-1300, 2500-2550
58	2	2	2892-2950	1371-1400, 1471-1500, 2792-2850
70	2	2	3380-3450	1665-1700, 1765-800, 3480-3550
$p = 3, 980 \leq n \leq 1000$ (об/мин), $0,02 \leq s \leq 0$				

58	2	3	2872-2950	897-917, 997-1017, 1845-1883, 1945-983, 2792-2850
82	2	3	4068-4150	1289-1317, 1389-417, 2629-2683, 2729-783, 3968-4050
$p = 4, 735 \text{ £ } n \text{ £ } 750 \text{ (об/мин)}, 0,02 \text{ }^3 \text{ } s \text{ }^3 \text{ } 0$				
58	2	4	2892-2950	660-675, 760-775, 1371-1400, 1471-1500, 2081-2125, 2181-2225, 2792-2850
70	2	4	3480-3550	807-825, 907-925, 1665-1700, 1765-1800, 2522-2575, 2622-2675, 3380-3450
88	2	1	1128-1150	1028-1050

Примечание. гармоники *SEH* присутствуют в множестве гармоник *SH* после исключения гармоники *PSH*.

В случае электрической асимметрии клетки ротора или его динамического эксцентриситета (ДЭ), когда ось вращения ротора (ось симметрии внутренней расточки статора) перемещена параллельно его оси симметрии, в спектре фазного тока статора будут присутствовать гармоники *DEH* с частотами f_{DEH} , зависящими от *k*-й гармоники напряжения и принадлежащие следующим множествам гармоник [17]:

$$\text{для } k = 1,7,\dots f_{DEH} \hat{=} \{A \hat{=} B\}; \quad (7)$$

$$\text{для } k = 5,11,\dots f_{DEH} \hat{=} \{A \hat{=} C\}; \quad (8)$$

$$\text{для } k = 3,9,\dots f_{DEH} \hat{=} \{B \hat{=} C\}, \quad (9)$$

где

$$A = \{|kf_0 + l6pf_r|\}; \quad B = \{|kf_0 + (4 + l6)pf_r|\};$$

$$C = \{|kf_0 + (2 + l6)pf_r|\}; \quad l = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (10)$$

Из вышеуказанного следует, что особенно важными для обнаружения и оценки повреждения являются гармоники *DEH* с частотами: относительно основной гармоники

$$|f_0 - 2pf_r| = (1 - 2s)f_0; \quad (11)$$

относительно гармоники *PSH*:
для АД типа $t = 0$ (согласно (4))

$$|f_0 + (gN_r - 2p)f_r|, |3f_0 - (gN_r + 2p)f_r|; \quad (12)$$

для АД типа $t = 1$ (согласно (5))

$$|f_0 - (gN_r - 2p)f_r|, |3f_0 - (gN_r + 2p)f_r|; \quad (13)$$

$$|f_0 + (gN_r + 2p)f_r|, |3f_0 + (gN_r - 2p)f_r|; \quad (14)$$

для АД типа $t = 2$ (согласно (6))

$$|f_0 - (gN_r + 2p)f_r|, |3f_0 + (gN_r - 2p)f_r|; \quad (15)$$

также те, частоты которых определяют зависимости согласно формулам (7)

$$f_{NSDEH} = f_{DEH} = |f_0 \pm N_s f_r| \quad (16)$$

и (3), (9)

$$f_{DEH} = f_{SH} = |3f_0 \pm N_r f_r|. \quad (17)$$

В табл. 2 для заданных p и s вычислены частоты гармоник *NSDEH*, характерные для ДЭ, при рекомендованных проектантам значениях чисел пазов статора N_s .

Следует отметить, что в случае асимметрии напряжений или СЭ те же самые гармоники токов статора имеют, как правило, разные амплитуды в каждой фазе. Поэтому для правильной оценки этих гармоник необходимо анализировать спектры токов трех (при соединении фаз в звезду - двух) фаз обмотки. Тогда удобно проводить анализ с использованием СС тока. При обнаружении асимметрии клетки ротора или ДЭ достаточно базироваться на анализе спектра только одного значения тока статора. Различие последствий обеих групп повреждений обусловлено свойствами электромагнитных связей между токами АД [15].

Диагностическая система. Объектом исследования на лабораторном стенде был двигатель Sg112M4 типа $t = 0$ и числе $g = 1$ со следующими параметрами: $P_H = 4$ кВт; $U_H = 380$ В(Д); $n_H = 1430$ об/мин; $I_H = 8,6$ А; число пазов статора $N_s = 36$; число пазов ротора со скосом и стержней клетки $N_r = 28$. Испытуемый двигатель, питаемый номинальным напряжением, работал при соединении фаз статора в звезду, токе статора $I \gg 3$ А и номинальном скольжении $s = 0,04$. Двигатель имел сменяемые роторы: № 1 – симметричный; № 2 – с обрывом одного стержня, № 3; – с обрывом двух расположенных рядом стержней; № 4 – с обрывом двух стержней с номерами 1 и 4; № 5 – с динамическим эксцентриситетом и № 6 – со статическим эксцентриситетом $e_s = 0,4$.

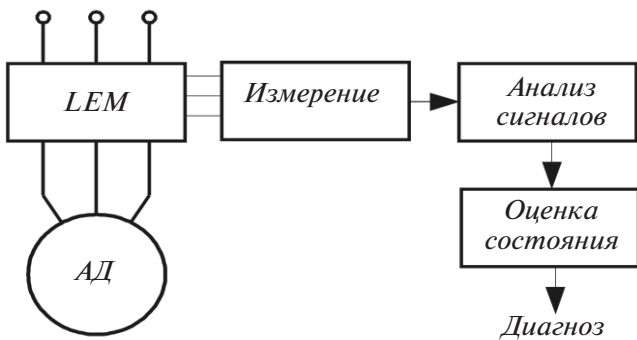
Уровень эксцентриситета определяется относительным значением e ($0 < e < 1$), которое равно $(d - d_{\min}) / d$, где d, d_{\min} – номинальное и минимальное значения воздушного зазора. Двигатель был соединен специальной муфтой с генератором постоянного тока с регулируемым возбуждением мощностью 3,6 кВт, питающим активные сопротивления.

На рисунке представлена структурная схема комплексной диагностической системы, в состав которой входят: измерения, сбор данных и обработка диагностических сигналов.

Таблица 2

Значения N_s						Значения частоты f_{NSDEH} при $f_0 = 50$ Гц	
36	42	48	54	60	72	$s \in 0,02$	$s \approx 0$
при p							
3		4		5		538-550	638-650
2			3		4	832-850	932-950
		2			3	1126-1150	1226-1250
				2		1420-1450	1520-1550
1					2	1714-1750	1814-1850
	1					2008-2050	2108-2150
		1				2302-2350	2402-2450

Диагностическая система включает измерительную приставку с датчиками тока HY15P LEM и напряжения LV25-P LEM; кондиционер сигнала NI BNC 2110 с низкочастотным фильтром; многофункциональную измерительную карту DAQCard-6036E National Instruments; ноутбук, используемый для накопления и обработки данных, с пакетом программ MATLAB.



Структурная схема комплексной диагностической системы

Для испытуемого двигателя были одновременно зарегистрированы временные сигналы напряжений и фазных токов при конфигурации аналоговых входов измерительной карты на разностном порядке. Каждый сигнал был зарегистрирован в течение 10 с при частоте отбора 10 кГц, что дало 10^5 проб для каждого измерения. Запись измерений на компьютерном диске позволяла проводить спектральный анализ и сравнение для выбранных случаев работы поврежденного и симметричного двигателей. В основанной на процедуре быстрого преобразования Фурье обработке сигналов использовалась функция окна Hanninga, что облегчало оценку спектра вблизи основной гармоники. В результате были получены спектры измеренных токов и напряжений с разрешающей способностью по частоте 0,1 Гц.

Результаты измерений и их анализ. В спектрах фазного тока статора АД и его симметричных составляющих выделены те гармоники, частоты кото-

рых удовлетворяют приведенным в статье формулам. Анализ взаимных соотношений амплитуд этих гармоник позволяет обнаружить вид повреждения ротора и сделать экспресс-оценку технического состояния двигателя.

В табл. 3 представлены значения частот и амплитуд выбранных гармоник тока статора для указанных выше вариантов ротора. Принято, что амплитуда основной гармоники тока при частоте f_0 равна 100 дБ.

Показатель повреждения (асимметрии) клетки k_r определяется из сравнения амплитуд основной гармоники тока и гармоники с частотой $(1 - 2s) / f_0$:

$$k_r = 100 I_{\max}^{(1-2s)/f_0} / I_{\max}^{f_0}, \% \quad (18)$$

Таблица 3

Частота гармоники $f_s = kf_0 + lf_r $, Гц	Номер ротора							
	1	2	3	4	5	6	7	
	Показатель повреждения клетки k_r							
	0,07	1,74	2,40	1,55	0,38	0,29	0,18	
k/l	f_s	Амплитуда гармоники тока, дБ						
1/-4	46	37,2	64,8	67,6	63,8	51,5	49,3	45,2
3/-4	54	31,2	53,4	56,9	52,0	39,8	38,8	37,4
3/0	150	55,1	55,3	55,9	55,5	55,5	54,0	53,7
3/-28	522	24,2	36,2	35,2	38,2	40,1	36,1	35,6
3/-32	618	11,9	30,1	28,2	32,3	21,8	15,7	12,8
1/-28	622	50,1	57,3	54,6	60,4	57,2	54,6	54,1
1/24	626	17,3	34,5	29,0	33,8	29,5	17,3	17,1
1/28	722	21,5	18,5	24,2	23,2	22,4	28,6	34,9
1/-36	814	17,9	24,0	25,7	25,3	28,8	33,3	32,0
3/28	822	38,5	40,8	39,5	43,1	44,0	45,1	43,6
1/36	914	14,0	24,9	21,8	20,6	28,7	33,5	31,4

Примечание: ротор № 7 – симметричный при асимметрии питающего напряжения.

Значение амплитуды какой-либо гармоники спектра тока является функцией многих параметров, в том числе значений СЭ и ДЭ, степени электрической асимметрии беличьей клетки, скольжения, а также места минимального воздушного зазора относительно статорной или роторной обмоток. Это обстоятельство делает задачу количественной оценки повреждения ротора неоднозначной.

Гармоника с частотой $f_s = (1 - 2s) / f_0$ является малочувствительным показателем ДЭ, а также не всегда правильно определяет уровень повреждения клетки. Ее амплитуда зависит от числа или расположения оборванных стержней (ротор № 4). Тогда полезно анализировать изменение амплитуд добавочных гармоник тока.

Асимметрия напряжений делает практически невозможной оценку уровня СЭ на основе изменения амплитуд гармоник *SEH*. Следует анализировать соотношения амплитуд СС тока, прямой «1» и обратной «2» последовательности.

В табл. 4 представлены соотношения амплитуд «1» и «2» симметричных составляющих: основной, PSH и SH (табл. 1) гармоник тока статора испытуемого двигателя.

Таблица 4

Номер ротора	$k_U, \%$	Соотношение амплитуд СС гармоник тока с частотой		
		50 Гц	622 Гц	722 Гц
		$I_2 / I_1, \%$	$I_1 / I_2, \%$	
1	0,57	0,58	1,17	100
2	0,61	1,62	0,86	120
3	0,72	1,76	1,23	115
4	0,82	0,89	0,83	95
5	0,64	0,95	0,81	95
6	0,91	1,17	1,05	43
7	1,24	8,61	4,07	126

Примечание. Показатель асимметрии напряжений равен отношению их симметричных составляющих обратной и прямой последовательности: $k_U = U_2 / U_1 100\%$.

Сравнение амплитуд гармоник и их СС для отличающихся повреждений приводит к следующим выводам:

амплитуды двух гармоник, близких гармонике *PSH*, вследствие повреждения клетки или ДЭ существенно увеличены, но для асимметрии напряжений или СЭ остаются на низком уровне, как в состоянии симметрии;

только вследствие эксцентриситета, особенно ДЭ, имеется существенное различие между амплитудами гармоник – генерированных через основ-

ную (большая) и третью (меньшая) гармоники напряжения;

гармоники *PSH* и *DEH* с частотами, зависящими от числа пазов ротора, имеют значительные амплитуды, но практически не зависят от вида повреждения;

вследствие ДЭ, СЭ или асимметрии напряжения питания амплитуды гармоник *NSDEH* с частотами, зависящими от числа пазов статора, имеют более высокие значения, чем при остальных видах повреждения;

вследствие асимметрии напряжения питания в амплитуде основной гармоники и гармоники *PSH* значительно растет доля амплитуды добавочной (вызванной асимметрией) СС;

только вследствие СЭ амплитуды симметричных составляющих гармоники *SEH* значительно отличаются.

Все вышеуказанные свойства спектра тока статора обусловлены характером связей между СС гармоник токов обмоток через активные и индуктивные сопротивления АД. При симметрии питания токи статора симметричны, их гармоники содержат только одну ненулевую СС. При асимметрии напряжений токи статора асимметричны, их гармоники содержат все СС, допустимые системой соединения фаз.

При асимметрии активных сопротивлений клетки токи статора симметричны, но содержат новые гармоники, вызванные асимметрией токов ротора. Вследствие неравномерности воздушного зазора (влияния пазов или эксцентриситета) возникают новые гармоники магнитной проводимости зазора и индуктивностей. Их присутствие увеличивает амплитуды тех гармоник тока, частоты которых зависят от числа пазов. В случае ДЭ каждая допустимая гармоника тока статора имеет только одну определенную ненулевую СС. При СЭ значения амплитуд СС новой (в сравнении с симметричным состоянием) гармоники тока статора прямо зависят от уровня эксцентриситета.

Анализ спектра тока статора электродвигателя. С помощью портативного измерительного набора проводились испытания нескольких десятков АД 6 кВ, работающих в разных системах электропривода. Напряжения и токи измерялись в реальном масштабе времени. Временные сигналы были получены от вторичных цепей измерительных трансформаторов нагруженного двигателя в установившемся режиме работы.

Асинхронный двигатель SZDVr1136t имеет число пар полюсов $p = 3$, число пазов $N_s = 72$, $N_r = 82$ и номинальные данные: $P_H = 800$ кВт; $U_H = 6$ кВ (Y соединение «звезда»); $I_H = 95$ А; $n_H = 985$ об/мин;

$f_H = 50$ Гц. Значения N_r и p показывают, что двигатель относится к типу $t=2$ с параметром $g=3$. Двигатель работает в качестве привода насоса воды с током 86,9 А. Рассчитанная на основе спектра тока статора частота вращения равна 991,4 об/мин.

По спектру фазного тока статора АД были определены гармоники, характеризующие состояние ротора. Значения частоты f_s , амплитуды A и соотношения SS этих гармоник даны в табл. 5.

Таблица 5

Значения		Частота и амплитуда гармоники тока		
k	l	f_s , Гц	A , Дб	I_2/I_1 , %
1	-6	49,1	33,0	-
1	0	50,0	100,0	1,44
3	-6	50,9	33,4	-
3	0	150	40,2	-
3	-78	1138,9	11,7	-
1	-72	1139,7	25,0	-
3	66	1140,6	12,1	-
3	-84	1238,0	16,8	-
1	-78	1238,9	17,0	-
1	72	1239,7	25,2	-
3	-82	1205,0	23,6	-
1	-82	1305,0	24,1	98
1	82	1405,0	14,2	118
1	-246	4014,9	8,1	94
1	-252	4114,0	7,5	-
1	246	4114,9	20,9	97
3	246	4214,9	18,1	-

Вычисленные показатели асимметрии: $k_U = 0,38$, $k_r = 0,045$.

Анализ значений гармоник тока позволяет заключить: клетка ротора двигателя исправна; обнаружены низкие уровни СЭ и ДЭ, которые могут быть следствием работы двигателя в вертикальном положении.

Выводы. 1. Обнаружение и достоверная оценка повреждений ротора методом спектрального анализа тока статора возможны при учете информации о токах всех фаз обмотки, состоянии системы питания и виде нагрузки.

2. Эффективность оценки повреждений повышается при сравнительном анализе изменений амплитуд, точно определенных гармоник тока и их симметричных составляющих.

3. В множестве выбранных гармоник находятся: сетевые (особенно основная и третья), пазовые, зависящие от числа пазов статора или ротора, и те,

частоты которых отличаются от упомянутых на $\pm 2pf_r$.

4. Нарушения электрической и магнитной симметрии состояния ротора развиваются постепенно, поэтому весьма важна оперативная диагностика состояния двигателя при первых признаках повреждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nandi S., Toliyat H.A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review. – IEEE Trans. on Energy Conversion, 2005, vol.20, № 4.
2. Bellini A., Filippetti F., Tassoni C., Capolino G.A. Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, vol.55, № 12.
3. Verucchi C.J., Acosta G.G. and Bengier F.A. A Review on Fault Diagnosis of Induction Machines. – Latin American Applied Research, 2008, № 38.
4. Thomson W.T., Gilmore R.J. Motor Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives-Fundamentals, Data Interpretation, and Industrial Case Histories. – Proc. of 32nd Turbomachinery Symposium, 2003.
5. Завидей В.И. Новые возможности в диагностике электрических машин. – Москва, 2010, <http://www.runef.ru/library/review/191/11725>.
6. Гашимов М.А., Мирзоева С.М. Рамазанов Н.К. Диагностика эксцентриситета электрических машин в условиях эксплуатации. – Электричество, 2005, № 6.
7. Новожилов А.Н., Кислов А.П., Андреева О.А. Метод численного моделирования работы асинхронного двигателя с обрывом стержней в короткозамкнутом роторе. – Электричество, 2004, № 11.
8. Скоробогатов А.А. Разработка методов контроля состояния короткозамкнутых обмоток роторов электродвигателей собственных нужд электростанций. – Иваново, 2006: <http://www.dissercat.com>
9. Сурков Д.В. Электромагнитные способы определения эксцентриситета и несимметрии короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей. – Оренбург, 2008: <http://www.dissercat.com>
10. Рогачев В.А. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронных электродвигателей по гармоническому составу тока статора. – Новочеркасск, 2008: <http://www.dissercat.com>
11. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока. – Новости электротехники, 2005, № 1(31).
12. Петухов В.С. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения. – Новости электротехники, 2008, №1 и 2.
13. Никитин А.Е., Ишаев А.Ю., Грибанов А.А. Диагностика состояния асинхронных двигателей на основе анализа спектра потребляемого тока. – Барнаул: Алтайский ГТУ, 2008: http://edu.secna.ru/media/f/epp_.pdf
14. Тонн Д.А. Анализ аналитических методов, применяемых для расчета несимметричных асинхронных машин. – Электротехнические комплексы и системы управления, 2006, № 2.
15. Weinreb K. Математические модели асинхронных машин с асимметрией воздушного зазора (по-польски). – PK Krakow, 1994 (Monografia № 169).
16. Weinreb K., Suowicz M. Possibilities of Rotor Eccentricity Diagnostics for Cage Induction Motors – Numerical Studies. – Periodica Polytechnica, Ser. El. Eng. (Budapest), 2001, vol.45, № 3–4.

17. **Weinreb K., W?giel T., Su?owicz M.** Influence of the Main Magnetic Circuit Saturation on Stator Current Spectrum for a Cage Induction Motor with Rotor Asymmetry. – Czasopismo Techniczne PK, 2006, Z.3.

18. **Вейнреб К.** Обнаружение динамического эксцентриситета и обрыва стержней клетки в асинхронном двигателе методом спектрального анализа тока статора. – Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2008, № 1(53).

[21.11.11]

*А в т о р : **Вейнреб Конрад** окончил в 1973 г. электротехнический факультет Горно-металлургической академии в Кракове. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию «Гармонический анализ токов и электромагнитного момента в несимметрических состояниях работы асинхронных машин». Адъюнкт кафедры электрических машин, заместитель директора Института электромеханических преобразований энергии Краковской политехники, Польша.*