



УДК 621.313.32

ГАЙДЕНКО Ю.А, канд. техн. наук,  
ВИШНЕВСКИЙ Т.С., инж.,

Национальный технический университет Украины "КПИ"

## МЕТОД ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ СТАТИЧЕСКОГО ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РОТОРА В СИНХРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ



ГАЙДЕНКО Ю.А



ВИШНЕВСКИЙ Т.С.

Описан, разработанный авторами, метод выявления и определения величины статического эксцентриситета ротора в синхронных генераторах. Метод основан на спектральном анализе кривых фазных ЭДС полученных в режиме холостого хода. В работе показано, что различные высшие гармоники в спектре кривой ЭДС обмотки статора по мере увеличения эксцентриситета изменяются по величине в разной степени, но по одинаковому закону. Сравнивая заранее известные величины отдельных гармоник в симметричном режиме с соответствующими величинами при наличии эксцентриситета можно получить величину эксцентриситета не прибегая к разбору самой конструкции генератора

**Введение.** Среди разного рода неисправностей в электрических машинах вращающегося типа выделяется эксцентриситет ротора или, дру-

гими словами, неравномерность воздушного зазора между статором и ротором. Данная неисправность может возникать как вследствие производственных дефектов, так и в процессе эксплуатации машины. Для повышения надёжности эксплуатации как технологических узлов, в составе которых есть электрические машины, так и самих машин важнейшей задачей является своевременное выявление неисправностей, причём, желательно, без снятия машины с эксплуатации.

Как известно, под эксцентриситетом ротора понимается смещение оси ротора относительно оси расточки статора [1]. В общем случае различают *статический* эксцентриситет, когда поверхность ротора концентрична относительно оси его вращения и *динамический* эксцентриситет, когда присутствует несоосность поверхности ротора с осью его вращения. В представленной работе рассматривается *статический эксцентриситет ротора* при параллельном смещении оси ротора относительно оси расточки статора.

Относительное значение статического эксцентриситета определяется по известной формуле:

$$\varepsilon = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_{\max} + \delta_{\min}}, \quad (1)$$

где  $\delta_{\max}$ ,  $\delta_{\min}$  — соответственно максимальное и минимальное значение воздушного зазора.

Объектом исследования в данной работе был принят явнополюсный синхронный генератор мощностью 30 кВт использующийся для установок автономного энергоснабжения.

Вызванная статическим эксцентриситетом ротора неравномерность воздушного зазора по

всей его длине вызывает появление дополнительных, а также усиливает существующие высшие гармоники магнитного поля. Это, в свою очередь, приводит к искажению кривых напряжения и тока в обмотках статора, появлению вибрации корпуса машины, появлению силы одностороннего магнитного притяжения, которая приводит к ещё большему увеличению эксцентриситета и повышенному износу подшипников.

Исходя из перечисленных негативных проявлений данной неисправности, ранее было разработано множество методов по выявлению наличия и определению степени статического эксцентриситета [2].

Все эти методы можно свести к трём главным направлениям:

- 1) механическая диагностика (непосредственное измерение с помощью щупов величины воздушного зазора в разных точках по всей длине зазора);
- 2) вибрационная диагностика;
- 3) электромагнитная диагностика.

Недостатком механической диагностики является необходимость останова машины при условии доступа к торцевой зоне магнитопровода. Если же такого доступа нет, то машину придется демонтировать и частично разобрать.

Основными недостатками вибрационной диагностики (анализ спектра и мест появления вибраций) являются косвенная зависимость вибрации от эксцентриситета и наличие большого числа неопределённых факторов, влияющих на спектр вибрации: конструкция, масса, жёсткость станины; физические свойства фундамента; вибрации сопряжённого с двигателем механизма и др. [1].

Электромагнитные методы диагностики статического эксцентриситета основаны на измерении электрических и магнитных величин, завися-



щих от неравномерности воздушного зазора. Эти методы позволяют обеспечить более точную диагностику, так как измеряемые величины непосредственно зависят от эксцентриситета.

Существуют две группы электромагнитных методов диагностики эксцентриситета:

1) методы, связанные с установкой различных датчиков внутри испытываемых машин до их сборки;

2) методы, позволяющие измерять эксцентриситет без предварительной установки внутри испытываемых машин дополнительных элементов.

Методы первой группы хоть и являются более точными, но, как и в случае с механической диагностикой требуют демонтажа машины и разбора её конструкции. Этим недостатком лишены методы второй группы, поскольку позволяют измерять величину эксцентриситета без снятия машины с эксплуатации, а в ряде случаев и без отключения нагрузочного механизма. Эти преимущества делают такие методы наиболее перспективными.

**Метод исследования.** Известно, что магнитное поле в воздушном зазоре синхронного генератора представляет собой сумму рабочей гармоники поля с числом пар полюсов  $\nu = p$ , высших гармоник обусловленных зубчатым строением магнитопроводов статора и, при наличии демпферной обмотки, ротора, дискретностью расположения проводников обмоток, насыщением магнитной цепи, а также различными дефектами, в частности наличием эксцентриситета ротора.

Гармоники поля, вызванные дискретным расположением обмоток статора и ротора, создаются высшими гармониками МДС этих обмоток [4].

Указанные гармоники поля, наряду с основной гармоникой, индуцируют ЭДС в обмотке статора. Поэтому для определения эксцентриситета ротора СГ необходимо проанализировать спектральный состав фазных ЭДС обмотки статора. При этом, определив какие гармоники и в какой

степени изменяются, можно говорить не только о наличии или отсутствии статического эксцентриситета, но и о самой его величине.

На сегодняшний день, единственными методами которые с достаточной точностью могут справиться с такой сложной задачей являются численные методы теории поля такие как, например, метод конечных элементов. Такие методы позволяют учитывать и реальную геометрию машины, и физические свойства материалов, и сложную картину распределения электромагнитного поля, и, что самое важное, учитывать взаимное влияние этих факторов, причем делать это в динамике (то есть, на каждом шаге по времени отслеживать перемещение ротора и учитывать связанное с этим перераспределение магнитного поля).

Метод конечных элементов на данный момент является общепризнанным надёжным средством исследования различных физических процессов во многих областях науки и техники. На его основе созданы множество программных продуктов значительно сокращающих время и трудозатраты на проведение соответствующих исследований. В данной работе был использован известный программный пакет Comsol.

**Математическая модель.** При расчете магнитного поля использовалось нестационарное нелинейное дифференциальное уравнение для векторного магнитного потенциала ( $A$ ) в движущейся электропроводной среде [5]

$$\vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \times \vec{A}) - \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \gamma \vec{V} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = -\vec{J}_{\text{стоп}}, \quad (2)$$

где  $\mu$ ,  $\gamma$  – магнитная проницаемость и электропроводность;  $\vec{V}$ ,  $-\vec{J}_{\text{стоп}}$  – векторы скорости движения среды и сторонней плотности тока;  $\vec{\nabla}$  – дифференциальный набла-оператор. В программном пакете Comsol была создана соответствующая модель (Рис. 1).

Движение ротора задано против часовой стрелки. Перемещение каждой точки ротора, включая его обмотки по осям X и Y, определялось согласно выражениям:

$$\begin{aligned} dx &= \cos(2\pi nt)X - \sin(2\pi nt)Y - X, \\ dy &= \sin(2\pi nt)X + \cos(2\pi nt)Y - Y, \end{aligned}$$

где  $n$  – скорость вращения ротора, об/сек;  $t$  – время, сек;  $x, y$  – соответственно координаты данной точки.

Важно отметить, что при перемещении ротора на каждом шаге по времени сетка конечных элементов автоматически перестраивалась согласно новой геометрии.

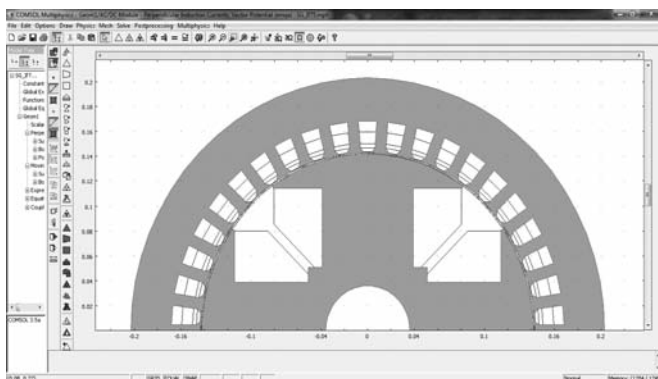


Рис. 1. Фрагмент поперечного сечения активной зоны синхронного генератора



Значение фазной ЭДС  $E_\phi$  рассчитывалось путем интегрирования напряженности электрического поля  $E_z$  по площади паза  $S_p$  вдоль обмотки статора  $l_a$  с числом витков в фазе  $w_\phi$ :

$$E_\phi = w_\phi \sum_q \frac{l_a}{S_p} \int E_z dS_p. \quad (3)$$

**Результаты расчета.** Спектральный состав кривой ЭДС – это результат влияния множества факторов, среди которых: величина воздушного зазора, число пазов на статоре и величина их открытия, наличие демпферной обмотки на полюсах ротора, насыщение магнитной цепи и др. Очевидно, что для достоверной диагностики статического эксцентриситета ротора нужно из всех гармоник спектра ЭДС выбрать лишь те которые зависят от эксцентриситета. Следовательно, необходимо создать такие условия, при которых влияние других факторов (особенно нелинейных) либо полностью исключено, либо минимизировано. К таким факторам можно отнести влияние нагрузки (реакция якоря) и насыщение магнитной цепи.

От реакции якоря достаточно просто можно "избавиться" перейдя в режим холостого хода. Что касается влияния насыщения магнитной цепи, то, очевидно, его можно минимизировать перейдя на линейный участок кривой намагничивания снизив ток возбуждения. Однако при этом нужно учитывать, что сильное снижение тока

возбуждения приведет к тому, что многие гармоники, полезные для определения эксцентриситета, получатся настолько малы, что их величины будут сопоставимы с ошибкой измерения. Следовательно, важной задачей является определение такого значения тока возбуждения, при котором с одной стороны влияние насыщения будет сведено к минимуму, с другой – значения амплитуд гармоник будут достаточными для их достоверного практического измерения.

С этой целью было проведено ряд численных экспериментов, в которых при отсутствии эксцентриситета ротора ("симметричный режим") для различных значений тока возбуждения  $I_f$  были получены кривые фазных ЭДС генератора в режиме Х.Х. Найденные зависимости были разложены в ряд Фурье, при этом анализировались *только амплитуды* гармоник с номерами до 49 включительно. Далее, по названным причинам, из рассмотрения были исключены те гармоники амплитуды ЭДС которых меньше 3 В.

Для более наглядного представления влияния насыщения магнитной системы на величины гармоник кривой ЭДС, полученные данные были приведены в процентное соотношение относительно 1-ой гармоники соответствующей своему току возбуждения по следующей формуле:

$$\Delta E_i = \frac{E_{li}}{E_{vi}} \cdot 100, [\%]. \quad (4)$$

где  $E_{li}$  – абсолютная величина ЭДС 1-ой гармоники для  $i$ -ого тока возбуждения;  $E_{vi}$  – абсолютная величина ЭДС  $v$ -ой гармоники  $i$ -ого тока возбуждения. Результаты представлены в Табл. 1.

Из таблицы хорошо видно, что при токе возбуждения  $I_f < 0,5 I_{fn}$  относительные значения величин гармоник практически не изменяются, а при  $I_f \geq 0,5 I_{fn}$  наблюдается изменение этих величин для разных гармоник в разной степени, причём как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. Это изменение объясняется тем, что токам возбуждения  $I_f < 0,5 I_{fn}$  соответствует линейный, а  $I_f \geq 0,5 I_{fn}$  – нелинейный участок на характеристике холостого хода.

Таким образом, совершенно очевидно, что для достоверного определения величины статического эксцентриситета необходимо проводить исследование при токе возбуждения, который лежит на прямом участке характеристики холостого хода ( $I_f < 0,5 I_{fn}$ ). В данной работе был принят ток возбуждения  $I_f < 0,25 I_{fn}$ , обес-

Таблица 1. Влияние насыщения магнитной цепи на гармоники кривой ЭДС

№ гарм.	Амплитуда ЭДС, в % относительно 1-ой гармоники					
	Ток возбуждения $I_f$ , в % от его значения в номинальном режиме ( $I_{fn}$ )					
	10%	25%	50%	75%	100%	125%
1	100	100	100	100	100	100
3	6,338	6,347	6,298	6,242	6,141	6,082
7	1,272	1,274	1,327	1,289	1,252	1,253
9	2,861	2,862	2,838	2,835	2,752	2,791
11	0,531	0,531	0,523	0,529	0,559	0,514
17	0,674	0,675	0,682	0,672	0,648	0,613
19	0,732	0,733	0,736	0,716	0,657	0,652
35	0,251	0,251	0,243	0,247	0,225	0,203
37	0,259	0,261	0,203	0,188	0,172	0,175
41	0,949	0,876	1,092	3,479	3,504	3,642
43	5,980	6,146	5,947	2,753	0,938	0,939
47	0,221	0,225	0,104	0,100	0,093	0,119



Таблиця 2. Амплитудные значения фазных ЭДС и их отклонения от симметричного режима

№ гарм	Фаза	Амплитуда ЭДС, В										
		Симметрия	при $\epsilon = 5\%$	$\Delta v, \%$	при $\epsilon = 10\%$	$\Delta v, \%$	при $\epsilon = 15\%$	$\Delta v, \%$	при $\epsilon = 25\%$	$\Delta v, \%$	при $\epsilon = 40\%$	$\Delta v, \%$
1	A	117,5	117,66	0,10	118,03	0,41	118,65	0,94	120,63	2,62	125,85	7,06
	B	117,55	117,66	0,09	118,04	0,42	118,65	0,94	120,58	2,59	125,79	7,02
	C	117,43	117,55	0,10	117,94	0,43	118,56	0,96	120,63	2,72	125,96	7,26
3	A	7,46	7,47	0,12	7,497	0,48	7,534	0,98	7,664	2,72	8,193	9,81
	B	7,524	7,531	0,09	7,557	0,44	7,605	1,08	7,649	1,66	7,994	6,25
	C	7,351	7,354	0,04	7,369	0,25	7,395	0,60	7,533	2,48	7,641	3,96
9	A	3,36	3,355	-0,27	3,378	0,42	3,4	1,07	3,47	3,15	3,637	8,12
	B	3,335	3,339	0,12	3,354	0,57	3,374	1,17	3,451	3,48	3,69	10,65
	C	3,299	3,319	0,61	3,319	0,61	3,34	1,24	3,423	3,76	3,586	8,70
43	A	7,220	7,242	0,25	7,284	0,83	7,371	2,04	7,776	7,64	8,549	18,34
	B	7,285	7,313	0,38	7,349	0,88	7,435	2,06	7,803	7,11	8,566	17,58
	C	7,379	7,397	0,24	7,448	0,94	7,535	2,11	7,823	6,02	8,628	16,93

печивающий достаточные для достоверного анализа эксцентриситета величины высших гармоник.

Поскольку при статическом эксцентриситете величина воздушного зазора по всей его длине не одинакова, то в разных катушках обмотки статора

будет наводиться разная по величине ЭДС. Так как в данном объекте исследования обмотка статора двухслойная с укорочением шага ( $\beta = 0,8$ ) и дробным числом пазов на полюс и фазу ( $q = 3,5$ ), то при наличии эксцентриситета воздушного зазора разные фазы обмотки будут находиться в разных магнитных условиях. Чтобы учесть данную несимметрию исследование было проведено для всех трёх фаз.

Введем значение отклонения величины амплитуды  $v$ -ой гармоники при эксцентриситете от амплитуды этой же  $v$ -ой гармоники в симметричном режиме.

$$\Delta_v = \frac{E_{v \text{ эксц}} - E_{v \text{ сим}}}{E_{v \text{ сим}}} \cdot 100, [\%]. \quad (5)$$

Полученные амплитудные значения ЭДС гармоник (только для тех у которых  $E_v > 3,0 \text{ В}$ ) и их отклонения от симметричного режима ( $\Delta_v$ ) для каждой величины эксцентриситета представлены для фаз А, В и С в Табл. 2. Как видно, для исследования статического эксцентриситета данного автономного СГ были отобраны 1-я, 3-я, 9-я и 43-я гармоники, так как их величина была больше заранее условленного значения  $3\text{В}$ . Из чего следует, что для подобных электрических машин оценка статического эксцентриситета определяется по основной гармонике ЭДС, гармоникам кратным трем (будут иметь место только в режиме холостого хода), а также зубцовым гармоникам.

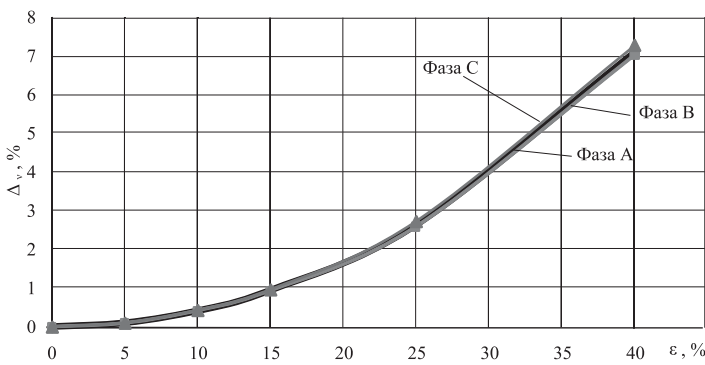


Рис. 2. Отклонение 1-й гармоники относительно симметричного режима

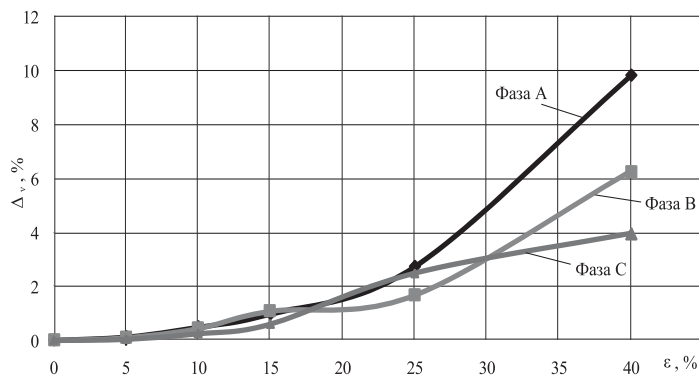


Рис. 3. Отклонение 3-й гармоники относительно симметричного режима





Ограничением для гармоник кратных трем является величина их проявления в каждой машине.

Зубцовые гармоники, определяемые как  $v_z = 2qmk \pm 1$ , где  $k = 1, 2, 3, \dots, n$  также ограничиваются их проявлением. Для исследуемого СГ с  $q = 3,5$ , зубцовыми гармониками являются:

- для  $k = 1$ ,  $v_z = 20; 22$ ,
- для  $k = 2$ ,  $v_z = 41; 43$ ,
- для  $k = 3$ ,  $v_z = 62; 64$ ,
- для  $k = 4$ ,  $v_z = 83; 85$ .

Как видно, для  $k = 1; 3$  зубцовые гармоники парные, то есть они отсутствуют в СГ. Для  $k = 2; 4$  гармоники имеют место в кривой ЭДС, но для исследования была выбрана только 43-я гармоника, так как амплитуда остальных гармоник оказалась меньше  $3B$ .

Представим графически зависимости для разных фаз (Рис. 2—5).

Из полученных графиков следует, что зависимости для исследуемых гармоник одинаковы по форме, но для разных фаз несколько отличаются по величине. Это отклонение, по нашему мнению, связано исключительно с погрешностью численного метода решения. Поэтому для дальнейшего анализа усредним фазные значения представленных зависимостей и покажем их на одном графике (Рис. 6).

Как было сказано выше, исследуемые гармоники изменяются по одному закону и, проведя полиномиальную аппроксимацию, было выявлено, что характер изменения всех выбранных гармоник (1, 3, 9, 43) можно описать одним уравнением 3-го порядка:

$$\varepsilon = k_1 \Delta_v^3 + k_2 \Delta_v^2 + k_3 \Delta_v + k_4, \quad (6)$$

где  $\Delta_v$  — величина отклонения гармоники относительно симметричного режима, %;  $\varepsilon$  — величина статического эксцентриситета, %;  $k$  — коэффициенты аппроксимирующего полинома.

Уравнения для исследуемого синхронного генератора:

1-й гармоники —

$$\varepsilon = 0,4745 \cdot \Delta_1^3 - 5,3892 \cdot \Delta_1^2 + 19,7155 \cdot \Delta_1 + 1,6656$$

3-й гармоники —

$$\varepsilon = 0,5555 \cdot \Delta_3^3 - 5,9719 \cdot \Delta_3^2 + 20,8596 \cdot \Delta_3 + 1,7512$$

9-й гармоники —

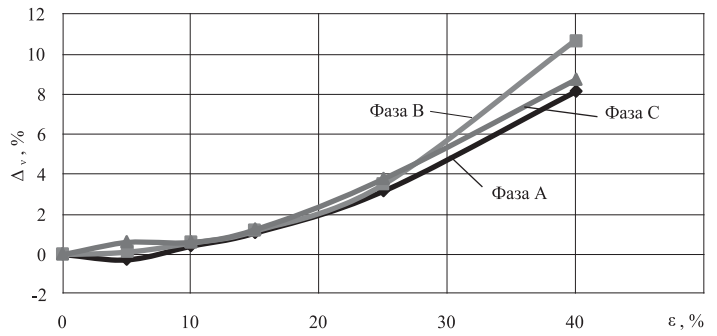


Рис. 4. Отклонение 9-й гармоники относительно симметричного режима

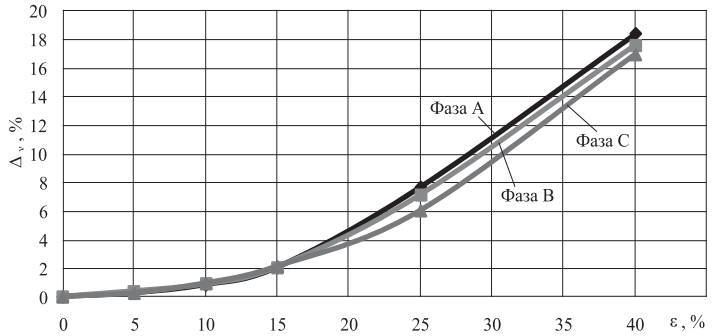


Рис. 5. Отклонение 43-й гармоники относительно симметричного режима

$$\varepsilon = 0,2513 \cdot \Delta_9^3 - 3,6219 \cdot \Delta_9^2 + 16,3208 \cdot \Delta_9 + 1,3861$$

43-й гармоники —

$$\varepsilon = 0,0409 \cdot \Delta_{43}^3 - 1,1173 \cdot \Delta_{43}^2 + 9,1642 \cdot \Delta_{43} + 1,4301.$$

Причем соответствующие коэффициенты всех гармоник имеют одинаковый знак и порядок.

Таким образом, при практическом применении данного метода задача сводится к тому, чтобы измерить соответствующие величины гармоник, найти отклонение ( $\Delta_v$ ) от заранее известного значения в симметричном режиме и подставить значение  $\Delta_v$  в уравнение для конкретной гармоники.

При этом сразу получаем значение статического эксцентриситета ( $\varepsilon$ ) в процентах. Кроме того, необходимо отметить, что **значение  $\varepsilon$  можно считать достоверным, только если это значение,**

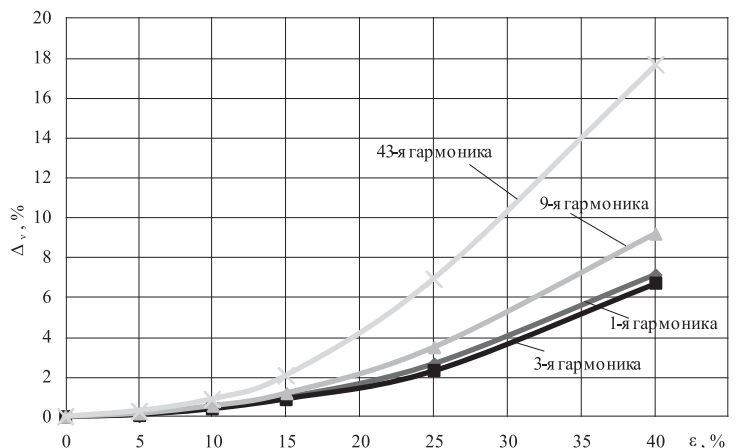


Рис. 6. Усредненный график 1-й, 3-й, 9-й, 43-й гармоник



**полученное по уравнениям для разных гармоник (в нашем случае по 1-й, 3-й, 9-й и 43-й) совпадает или очень близко по величине.**

Эталонные значения соответствующих гармоник в симметричном режиме можно получить либо расчетным путем, зная геометрию машины, по методике аналогичной описанной в данной работе, либо практически измерив на эталонном образце на заводе-изготовителе или в специализированной лаборатории.

**Выводы и рекомендации.**

1. Установлено, что статический эксцентриситет влияет на гармонический состав ЭДС фазы обмотки статора исследуемого СГ. Способ исследования гармонического состава фазной ЭДС позволяет обнаружить наличие и оценить величину указанной неисправности.

2. Для исключения влияния насыщения магнитной системы на спектр кривой ЭДС её осциллографирование рекомендуется проводить в режиме холостого хода при токе возбуждения в пределах линейного участка характеристики холостого хода.

3. Расчеты показывают, что для определения величины статического эксцентриситета достаточно измерить амплитуды гармоник ЭДС только одной (любой) фазы;

4. Для достоверной диагностики статического эксцентриситета в подобных синхронных генераторах необходимо из общего состава гармоник измерить только 1-ю (основную) гармонику, 3-ю, 9-ю, а также зубцовую гармонику (в нашем случае 43-ю). Остальные гармоники, вследствие их малости, рассматривать нет необходимости.

5. Исследования показали, что зависимости отклонений величины амплитуд рассматриваемых гармоник (по сравнению с симметричным режимом) при разном значении эксцентриситета воздушного зазора описываются одним законом.

6. О достоверном наличии статического эксцентриситета можно утверждать, только если полученные по вышеприведенному закону значения для разных гармоник совпадают по величине.

7. Данный метод можно эффективно применять для диагностики статического эксцентриситета ротора как в сочетании с другими практическими методами, так и независимо.

8. Предложенный метод может быть адаптирован для диагностики эксцентриситета в мощных турбо- и гидрогенераторах, а также в синхронных компенсаторах.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Никиян Н.Г., Сурков Д.В.* Освоение и оценка методов электромагнитной диагностики эксцентриситета ротора асинхронных двигателей // Вестник ОГУ. — 2005. — № 2. — С. 163–166.
2. *Никиян Н.Г.* Многофазная реальная асинхронная машина: математическое моделирование, методы и средства диагностики: Монография. — Оренбург: ГОУ ВПО Оренбургский государственный университет, 2003. — 334 с.
3. *Геллер Б., Гамата В.* Высшие гармоники в асинхронных машинах. — М.: Энергия, 1981. — 352 с.
4. *Вольдек А.И.* Электрические машины. — М.—Л.: Энергия, 1974. — 840 с.
5. *Васьковський Ю.М.* Польовий аналіз електричних машин. — К.: НТУ "КПІ", 2007. — 192 с.

© Гайденко Ю.А., Вишневикий Т.С., 2011

