

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Н. Г. НИКИЯН, М. Е. ИОНДЕМ, Г. С. АКОПЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РОТОРА  
 АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Наиболее часто встречающимся видом неравномерности воздушного зазора асинхронных двигателей (АД) является статический эксцентриситет. В выпускаемых АД согласно статистическим данным относительный эксцентриситет  $\varepsilon = e/\delta_0$  ( $e$  — смещение оси ротора относительно оси статора,  $\delta_0$  — номинальный зазор) составляет (10—80)%, а иногда может доходить до 100% (задевание ротора о статор).

В данной статье сделана попытка уточнить и применить косвенный метод [1, 2] для определения относительного эксцентриситета АД малой мощности, который заключается в следующем. При эксцентриситете в зазоре АД дополнительно возникают гармоники поля порядка  $p \pm n$  ( $p$  — число пар полюсов,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ), амплитуда которых зависит от величины  $e$ . Наиболее сильно выражены гармоники порядка  $p \pm 1$ . На статоре укладывается система измерительных катушек и по индуцированной в них ЭДС определяется величина  $e$ .

При эксцентриситете ротора известно аналитическое выражение [3] для индукции магнитного поля в зазоре АД при допущениях, что статор и ротор гладкие, а магнитная проницаемость стали  $\mu_c = \infty$ . Можно показать, что при наличии зубчатости статора и ротора получается выражение такого же вида, в котором коэффициенты магнитной проводимости воздушного зазора учитывают не только эксцентриситет, но и зубчатость. Полагаем, что гармоники поля при эксцентриситете не демпфируются короткозамкнутой клеткой ротора.

При  $p = 1$ :

$$B_1(\alpha, t) = -B_1 \Lambda_0 \left[ 1 - \left( \frac{\Lambda_1}{2\Lambda_0} \right)^2 \right] \cos(\alpha - \omega t) + B_1 \Lambda_0 \left( \frac{\Lambda_1}{2\Lambda_0} \right)^2 \cos(\alpha + \omega t) - B_1 \frac{\Lambda_1}{2} \cos(2\alpha - \omega t), \quad (1)$$

а при  $p > 1$  —

$$B_p(\alpha, t) = -B_p \Lambda_0 \cos(p\alpha - \omega t) - B_p \frac{\Lambda_1}{2} \cos[(p+1)\alpha - \omega t] - B_p \frac{\Lambda_1}{2} \cos[(p-1)\alpha - \omega t], \quad (2)$$

где  $B_1$  и  $B_p$  — амплитуды основной гармоники индукция при отсутствии зубчатости и эксцентриситета, соответственно, при числе пар полюсов  $p = 1$  и  $p > 1$ .

Коэффициенты удельной магнитной проводимости  $\Lambda_0$  и  $\Lambda_1$  учитывают влияние зубчатости и эксцентриситета и определяются по формулам:

$$\Lambda_0 = \frac{1 - \overset{*}{b}_1 - \overset{*}{b}_2}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} + \frac{\overset{*}{b}_1}{\sqrt{k_1^2 - \varepsilon^2}} + \frac{\overset{*}{b}_2}{\sqrt{k_2^2 - \varepsilon^2}}; \quad (3)$$

$$\Lambda_1 = \frac{2}{\varepsilon} \left[ \frac{1 - \overset{*}{b}_1 - \overset{*}{b}_2}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} + \frac{\overset{*}{k}_1 \overset{*}{b}_1}{\sqrt{k_1^2 - \varepsilon^2}} + \frac{k_2 \overset{*}{b}_2}{\sqrt{k_2^2 - \varepsilon^2}} - 1 \right], \quad (4)$$

где  $\overset{*}{b}_1 = \frac{b_1}{t_1}$ ;  $\overset{*}{b}_2 = \frac{b_2}{t_2}$ ;  $k_1 = 1 + \frac{b_1}{5\delta_0}$ ;  $k_2 = 1 + \frac{b_2}{5\delta_0}$ ;  $b_1$ ,  $b_2$  и  $t_1$ ,

$t_2$  — соответственно открытия пазов и зубцовые деления статора и ротора.

Из выражения (1) следует, что в двухполюсной машине при эксцентриситете, помимо гармоники поля с числом пар полюсов  $p + 1 = 2$ , возникает обратно-синхронное поле с  $p = 1$ . При эксцентриситете гармоники поля порядка  $p = \pm 1$  не индуцируют ЭДС в фазной обмотке статора. Уравнение напряжений обмотки статора имеет обычный вид [4], откуда при известных параметрах и напряжений получается действующее значение ЭДС, индуцированной основной гармоникой индукции. Амплитуда основной гармоники индукции при  $p = 1$  и  $p > 1$  определяется из первых членов этих выражений. Тогда действующие значения основной гармоники ЭДС будут соответственно равны [4]:

при  $p = 1$  —

$$E_p = E_1 = 2\sqrt{2} f_1 B_1 \Lambda_0 \left[ 1 - \left( \frac{\Lambda_1}{2\Lambda_0} \right)^2 \right] \tau_1 l \omega_1 k_{061}; \quad (5)$$

при  $p > 1$  —

$$E_p = 2\sqrt{2} f_1 B_p \Lambda_0 \tau_p l \omega_1 k_{061}. \quad (6)$$

Здесь  $\tau_1$  и  $\tau_p$  — полюсное деление при  $p = 1$  и  $p > 1$ ;  $l$  — активная длина статора;  $\omega_1$  и  $k_{061}$  — число витков и обмоточный коэффициент фазы обмотки статора.

В каждой измерительной катушке [1, 2] индуцируется ЭДС от гармоник поля при эксцентриситете и от высших гармоник поля в зазоре, вызванных зубчатостью. Для выделения ЭДС, индуцированной одной гармоникой поля при эксцентриситете, на статоре укладываются две измерительные катушки, соединенные последовательно согласно. Катушки имеют диаметральный шаг в поле этой гармоники и сдвинуты относительно друг друга на угол  $\alpha$ . При необходимости получить ЭДС гармоники порядка  $p - 1$  угол сдвига равен  $\alpha = \frac{\pi}{p+1}$  [2]. При этом

ЭДС гармоники порядка  $p + 1$  в системе измерительных катушек равна нулю. Однако, высшие гармоники ЭДС, вызванные зубчатостью, при этом полностью не исключаются. Их величина зависит от соотношения чисел пазов статора и ротора и пар полюсов. В одной измерительной катушке действующее значение ЭДС, индуцированной гармоникой поля порядка  $p - 1$ , равно

$$E_{k(p-1)} = 2\sqrt{2} f_1 B_p \frac{\Lambda_1}{2} l_{\tau_{(p-1)}} w_k, \quad (7)$$

где  $\tau_{(p-1)}$  и  $w_k$  — шаг и число витков измерительной катушки.

ЭДС системы измерительных катушек, сдвинутых на угол  $\alpha$ , равна

$$E_k = 2E_{k(p-1)} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{p-1}{p+1}\right). \quad (8)$$

Из формул (7) и (9) следует:

$$\frac{E_k}{E_p} = \frac{\Lambda_1}{\Lambda_0} \cdot \frac{p}{p-1} \cdot \frac{w_k}{w_1 k_{061}} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{p-1}{p+1}\right), \quad (9)$$

а в четырехполюсной машине —

$$\frac{E_k}{E_{(p-2)}} = \sqrt{3} \frac{\Lambda_1}{\Lambda_0} \frac{w_k}{w_1 k_{061}}. \quad (9a)$$

В двухполюсной машине целесообразно выделить гармонику ЭДС порядка  $p + 1 = 2$ , а угол сдвига взять равным  $\alpha = \pi$ . Тогда:

$$\frac{E_k}{E_1} = \frac{\Lambda_1}{2\Lambda_0 \left[1 - \left(\frac{\Lambda_1}{2\Lambda_0}\right)^2\right]} \frac{w_k}{w_1 k_{061}}. \quad (9b)$$

Для определения величины относительного эксцентриситета необходимо измерить значения ЭДС  $E_k$  и  $E_p$  (по [4]) и затем воспользоваться формулами (9), (3) и (4). Чтобы исключить демпфирующее действие ротора и влияние насыщения на ЭДС  $E_k$ , следует измерения проводить при частоте вращения, синхронной по отношению к данной гармонике эксцентриситета и при пониженном напряжении.

Исследования проводились на трехфазных двигателях типа 4АА63В2 (550 Вт, 380 В, 2800 об/мин) — АД1 и 4АА63В4 (370 Вт, 380 В, 1370 об/мин) — АД2, снабженных составными подшипниковыми щитами с эксцентричными стаканами. Заданная величина статического эксцентриситета создавалась поворотом стакана на определенный угол. На статоре в щлицах пазов были уложены две измерительные катушки с соблюдением указанных выше условий, соответственно, для  $p = 1$  и  $p > 1$ . Каждая катушка имела 10 витков из провода ПЭЛШО  $\varnothing 0,1$  мм.

Ротор АД1 приводился во вращение с синхронной частотой 1500 об/мин, соответствующей гармонике эксцентриситета  $p + 1 = 2$

при напряжении 128 В. Ротор АД2 приводился во вращение с синхронной частотой 3000 об/мин, соответствующей гармонике эксцентриситета  $p - 1 = 1$  при напряжении 54 В.

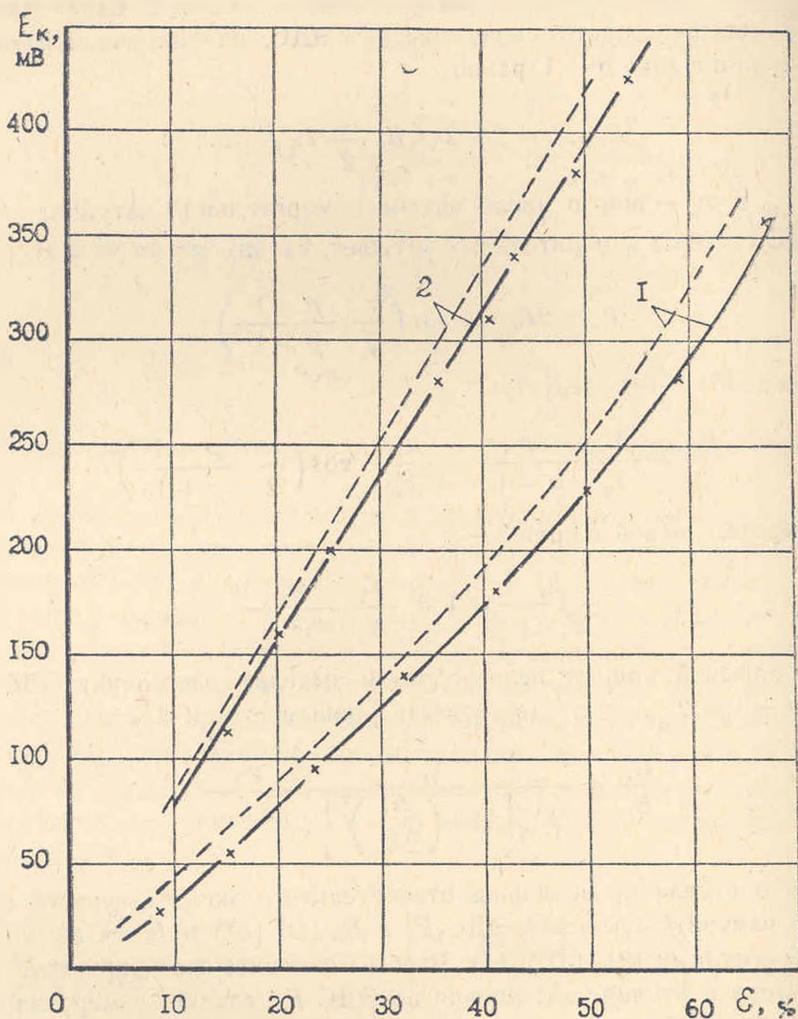


Рис. Зависимость ЭДС измерительных катушек от эксцентриситета: 1— для АД1, гармоника  $p + 1 = 2$ ; 2— для АД2, гармоника  $p - 1 = 1$ . — — — — расчет, —×—×— — эксперимент.

ЭДС системы измерительных катушек определялась при разных значениях эксцентриситета электронным вольтметром типа Ф 563 (класс точности 0,5). Кривые ЭДС были значительно искажены гармониками звукового порядка. Гармоники эксцентриситета выделялись с помощью измерителя нелинейных искажений типа С6-5. Эти же гармоники ЭДС были рассчитаны изложенным выше способом. Значения основной гармоники ЭДС  $E_p$  определялись по измеренным значениям напряжения,  $\cos \phi$  и активного сопротивления  $r$ , (формула (5)). Величина индуктивного сопротивления  $x$ , в АД малой мощности обычно меньше

протнвления  $r_1$  и колебания значения  $x$ , при изменении эксцентриситета слабо влияют на величину  $E_p$ . Поэтому в формулу (5) подставлялось значение  $x$ , измеренное при концентричном положении ротора.

Расчетные и измеренные значения ЭДС гармоник эксцентриситета близки друг к другу (рис.). При значениях  $\epsilon \geq 20\%$  разница между расчетными и измеренными значениями не превышает (10—12)%. Таким образом, при использовании рассмотренного метода измерения эксцентриситета в серийных АД малой мощности необязательно иметь тарировочную кривую, полученную экспериментально на эталонном АД с регулируемым эксцентриситетом. Значение статического эксцентриситета может быть получено также по расчетной кривой. Для повышения точности определения эксцентриситета при этом необходимо:

1) измерения ЭДС производить при напряжении (0,25—0,4)  $U_n$  и синхронной скорости ротора, соответствующей измеряемой гармонике эксцентриситета;

2) исходить из ЭДС гармоники эксцентриситета, выделенной с помощью специальных приборов.

ЕрПИ им. К. Маркса

5. I. 1984

Ն. Գ. ՆԻԿԻՅԱՆ, Մ. Ե. ՅՈՆԴԵՄ, Գ. Ս. ՀԱԿՈՔՅԱՆ

ՓՈՔԻ ԶՁՈՐՈՒԹՅԱՆ ԱՍԻՆԽՐՈՆ ՇԱՐԺԻՉՆԵՐԻ ՌՈՏՈՐԻ ԱՐՏԱԿԵՆՏՐՈՆՈՒԹՅԱՆ ՄԵՇՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

### Ա մ փ ո փ ու մ

Դիտարկված է տեղսղրված շափիչ կոճերի միջոցով ստատիկ հարաբերական արտակենտրոնության որոշման անուղղակի եղանակ, որի ժամանակ նշված կոճերում ինդուկցվում է արտակենտրոնության դեպքում դաշտի հարմոնիկների հետ պայմանավորված էլ. շ. ու.։ Առաջարկություններ են արված շափված էլ. շ. ու.-ի մեծությամբ արտակենտրոնության հաշվարկային արժեքի ճշտման համար։ Հաշվարկների արդյունքները հաստատված են փորձնական ավյալներով։

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Frohne H. Theorie einer Meßeinrichtung zur Überwachung von Luftspaltänderungen in Asynchronmaschinen mit Käfigläufern. — ETZ-A, Bd. 87 (1966), H. 4, s. 127—132.
2. Frohne H., Seinsch H. O. Zusammenhang zwischen Läuferexzentrizität und induzierter Meßspannung bei Luftspaltüberwachungseinrichtungen ETZ-A, Bd. 90 (1969), H. 2, s. 38—43.
3. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. — М.: Энергия, 1981. — 352 с.
4. Вольдек А. И. Электрические машины. — М.: Энергия, 1974. — 840 с.