ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 145 1966

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ПО ДАННЫМ ОТК О ЧИСЛЕ ЗАДЕВАНИЙ РОТОРА ЗА СТАТОР

О. П. МУРАВЛЕВ, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Рекомендовано семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники.)

Воздушный зазор асинхронных электродвигателей не является равномерным из-за технологических причин. Более того, неравномерность увеличивается в процессе эксплуатации. Существует два вида неравномерности воздушного зазора: статическая неравномерность, определяющаяся погрешностями размерной цепи, и вращающаяся неравномерность, вызванная неконцентричным расположением пакета ротора относительно оси вала.

Мы будем рассматривать только статическую неравномерность (статический эксцентриситет), так как неконцентричность пакета ротора относительно вала имеет обычно небольшую величину.

Неравномерность воздушного зазора вредно отражается на характеристиках двигателя: уменьшается к. п. д., увеличиваются потери в стали (на 15—30%) [1] увеличиваются провалы в кривой момента. увеличивается время разгона, перераспределяется ток в параллельных ветвях. Кроме этого, появляется возможность задевания ротора за статор, что приводит к высоким местным перегревам. Все эти факторы сокращают срок службы изоляции и понижают надежность работы двигателя.

Вероятность задевания в процессе работы увеличивается из-за износа подшипников. Долговечность подшипника по усталостной прочности обратно пропорциональна кубу радиальных усилий, возникающих при неравномерном воздушном зазоре. Но в электрических машинах подшипники обычно выбираются с большим запасом, износ подшипников из-за усталостного разрушения материала не является доминирующим видом отказов, поэтому влиянием эксцентриситета на срок службы можно пренебречь.

Расчет усилий, вибраций, шумов, возникающих при наличии эксцентриситета достаточно полно разработан, но сами величины эксцентриситета, на которые ведется расчет, мало обоснованы. Нормами допускается предельная величина эксцентриситета 0,15, а расчеты и опытные данные показывают, что в ряде случаев эксцентриситет значительно больше. Статистика эксцентриситетов ведется не у всех машин, измерение воздушного зазора обычно производится с помощью щупов. Конструкция ряда машин вообще исключает возможность измерений таким способом, а косвенные методы измерения неравномерности воздушного зазора не получили широкого применения.

В связи с этим возникает задача получения простым путем сведений о средней величине и законе распределения эксцентриситетов без проведения дополнительных измерений.

В настоящей работе предлагается вероятностно-статистический метод определения эксцентриситетов по данным испытательной станции завода.

Если имеется начальное смещение оси вала относительно расточки статора, то возникает магнитное неуравновешенное усилие P, которое направлено в сторону наименьшего зазора. Сила P вызывает упругую деформацию вала и подшипника, выбирается радиальный зазор подшипника и зазор между наружным кольцом и щитом в направлении действия силы, что ведет к дальнейшему увеличению усилия. При определенном начальном эксцентриситете может произойти задевание ротора о статор.

Будем считать, что задевание ротора о статор наступает при выполнении равенства

$$e_0 + f_\delta + \delta_п + x + y = \delta, \tag{1}$$

где δ — воздушный зазор, *см*;

e_0 — начальное смещение оси вала относительно оси расточки статора, *см*;

f_δ — величина упругой деформации вала, *см*;

$\delta_п$ — смещение внутреннего кольца подшипника относительно наружного под действием магнитного неуравновешенного усилия, *см*;

x — радиальный зазор подшипника в сборе, *см*;

y — зазор между наружным кольцом подшипника и щитом, *см*.

Случайные величины x, y и δ имеют нормальный закон распределения с плотностью

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}}\, exp\left[-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_{x^2}}\right], \tag{2}$$

где m_x — среднее значение величины x;

σ_x — среднее квадратическое отклонение величины x.

При композиции нормальных величин $u = \delta - x - y$ получается снова нормальный закон [2] с параметрами

$$m_u = m_\delta - m_x - m_y, \tag{3}$$

$$\sigma_u^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_\delta^2. \tag{4}$$

Средние значения и средние квадратические отклонения случайных величин могут быть легко найдены, если известен тип подшипника и его посадки в машине. Способ их расчета дается в примере.

Найдем величину e_0, при которой происходит задевание ротора за статор, когда все случайные величины имеют средние значения.

Используя формулы для расчета силы одностороннего магнитного притяжения [3], величины упругой деформации [4] и смещения внутреннего кольца подшипника относительно наружного [5], можно составить систему уравнений для определения l_0:

$$\left.\begin{aligned} & e_0 + f_\delta + \delta_п = m_u, \\ & P = \kappa_1 Dl\,\frac{e_0}{m_\delta}, \\ & \delta_п = 98\cdot 10^{-6}\sqrt[3]{\frac{P^2}{4d_ш}}, \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

где D и l — диаметр и длина ротора, *см*;

K_1 — 1,5 для $2p > 2$ и $K_1 = 1$ для $2p = 2$;

K — жесткость вала, *кг/см*;

$d_ш$ — диаметр шарика подшипника, *мм*;

m_δ — среднее значение воздушного зазора, *см*.

После несложных преобразований получаем уравнение для определения

$$e_0\left(1+\frac{K_1 Dl}{\delta K}\right)+98\cdot 10^{-6}\sqrt[3]{\frac{K_1^2 D^2 l^2 e_0^2}{4m_\delta^2 d_ш}}=m_ц. \tag{6}$$

Это уравнение для каждого частного случая довольно просто решается методом интерации.

Плотность распределения эксцентриситета подчиняется закону Релея [6]

$$f(\varepsilon)=\frac{\varepsilon}{D}\;exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2D}\right), \tag{7}$$

где $\varepsilon=\frac{e}{m_\delta}$ — эксцентриситет;

D — дисперсия.

Кривая $f(\varepsilon)$ для $D = 0{,}1$ представлена на рис. 1. Площадь, ограниченная кривой $f(\varepsilon)$, осью абсцисс и прямой $\varepsilon_m = 1$, пропорциональна числу машин, при сборке которых было обнаружено задевание ротора о статор. Путем регулировки (заменой или поворотом щитов) это задева-

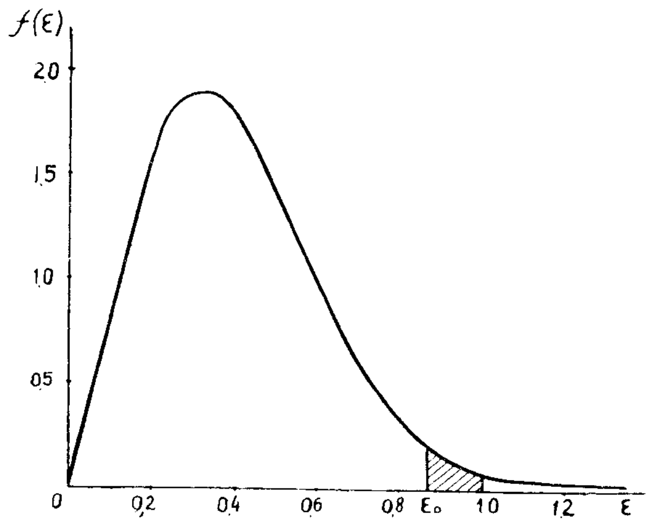

Рис. 1.

ние обычно ликвидируется слесарем-сборщиком. Заштрихованная на рисунке площадь равна доли машин q, у которых задевание ротора о статор было обнаружено на испытательной станции

$$q=\int_{\varepsilon_0}^{1}\frac{\varepsilon}{D}\;e-\frac{\varepsilon^2}{2D}d\varepsilon. \tag{8}$$

Величина q фиксируется в документах испытательной станции. Зная q и предварительно рассчитав эксцентриситет по уравнению (6), можно определить дисперсию D, которая однозначно определяет закон распределения. Решение уравнения (8) может быть получено численным методом.

Среднее значение эксцентриситета машин данной партии

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{\pi D}{2}}. \tag{9}$$

Доля машин, имеющих эксцентриситет меньше заданного ε:

$$q' = 1 - e - \frac{\varepsilon^2}{2D}. \tag{10}$$

Для обеспечения расчетов на рис. 2 представлено семейство кривых $D = f(q)$, рассчитанных по формуле (8), для нескольких значений эксцентриситетов ε_0.

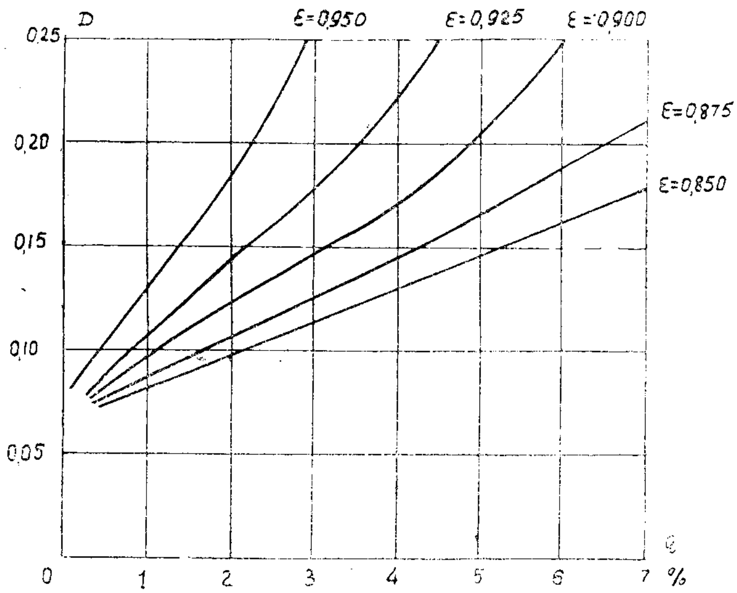

Рис. 2.

Величина q подсчитывается по формуле (8) в предположении, что величина воздушного зазора неизменна. В действительности это случайная величина, имеющая нормальный закон распределения. В силу того, что кривая (рис. 1) в окрестности точки $\varepsilon = \varepsilon_0$ не параллельна оси абсцисс, дополнительное количество машин, которые будут иметь задевания ротора за статор при уменьшении воздушного зазора, больше, чем количество машин, у которых ликвидируется задевание при увеличении воздушного зазора. Это должно быть учтено уменьшением предельного эксцентриситета за величину

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta q}{2 f(\varepsilon_0)}, \tag{11}$$

где $\Delta q = q_1 - q_2$ — увеличение доли машин, имеющих задевание ротора за статор, из-за колебания величины u;

q_1 — доля машин, у которых появилось задевание из-за уменьшения величины u относительно среднего значения;

q_2 — доля машин, у которых ликвидировалось задевание из-за увеличения величины

$$q_1 = \int_0^{\varepsilon_0} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon}{\sqrt{2\pi} D\sigma} e^{\frac{\varepsilon^2}{2D} - \frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} d\varepsilon\, d\varepsilon, \tag{12}$$

$$q_2 = \int_{\varepsilon_0}^{1} \int_{0}^{1-\varepsilon_0} \frac{\varepsilon}{\sqrt{2\pi}\, D\sigma}\, e^{-\frac{\varepsilon^2}{2D} - \frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} d\varepsilon\, d\varepsilon. \tag{13}$$

Величины q_1 и q_2 можно найти численным методом. Если величину интервала взять $0{,}5\sigma$, то

$$q_1 = s\int_0^{0,5\sigma} f(\gamma)\, d\gamma + (s + \Delta s)\int_{0,5\sigma}^{\sigma} f(\gamma)\, d\gamma + (s + 2\Delta s) \times$$

$$\times \int_{\sigma}^{1,5\sigma} f(\gamma)\, d\gamma + (s + 3\Delta s)\int_{1,5\sigma}^{2\sigma} f(\gamma)\, d(\gamma), \tag{14}$$

$$S = 0{,}5\sigma\, \frac{f(\varepsilon_0 - 0{,}5\sigma) + f(\varepsilon_0)}{2}, \tag{15}$$

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{н}}}{m_\delta}; \qquad \frac{u}{m_\delta} = \gamma, \tag{16}$$

$$\Delta s = 0{,}5\,\sigma\, \frac{f(\varepsilon_0 - 0{,}5\sigma) - f(\varepsilon_0)}{2}. \tag{17}$$

При $\qquad 1 - \varepsilon_0 \geqslant 2\sigma$

$$q_2 = (S - \Delta S)\int_0^{0,5\sigma} f(\gamma)\, d\gamma + (S - 2\Delta S)\int_{0,5\sigma}^{\sigma} f(\gamma)\, d\gamma +$$

$$+ (S - 3\Delta S)\int_{\sigma}^{1,5\sigma} f(\gamma)\, \Delta\gamma + (S - 4\Delta S)\int_{1,5\sigma}^{2\sigma} f(\gamma)\, d\gamma, \tag{18}$$

$$\Delta q = q_1 - q_2 = \Delta S\left[\int_0^{0,5\sigma} f(\gamma)\, d\gamma + 3\int_{0,5\sigma}^{\sigma} f(\gamma)\, d\gamma + \int_{\sigma}^{1,5\sigma} f(\gamma)\, d\gamma + \right.$$

$$\left. + 7\int_{1,5\sigma}^{2\sigma} f(\gamma)\, d\gamma\right] = 1{,}409\,\Delta S. \tag{19}$$

Величина интегралов определяется по таблицам [7].

Если $1 - \varepsilon_0 < 2\sigma$, например, $1 - \varepsilon_0 = 1{,}2$, то

$$q_2 = (S - \Delta S)\int_0^{0,5\sigma} f(\gamma)\, d\gamma + (S - 2\Delta S)\int_{0,5\sigma}^{\sigma} f(\gamma)\, d\gamma + \int_{\sigma}^{1,2\sigma} (f(\gamma)\, d\gamma. \tag{20}$$

Аналогично можно найти q_2 для любого соотношения между ε_0 и σ.

Вычисленная поправка $\Delta\varepsilon$ находится с 95% достоверностью.

При значительном превышении температуры ротора над температурой статора ротор расширяется больше, что эквивалентно уменьшению воздушного зазора.

В процессе эксплуатации эксцентриситет увеличивается из-за износа подшипников. Износ подшипников представляет случайный процесс со средней скоростью g, т. е. во времени эксцентриситет изменяется по закону

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{нач}} + gt.$$

Доля машин, у которых появится задевание ротора за статор за время Δt,

$$\Delta q = \int\limits_{\varepsilon_0 - g\Delta t}^{\varepsilon_0} \frac{\varepsilon}{D} e - \frac{\varepsilon^2}{2D}. \tag{21}$$

Пример расчета

Расчет проводился для электродвигателя АЗ1-4, имеющего следующие данные:

$D = 8{,}9$ *см*, $l = 6{,}4$ *см*, $\delta = 0{,}025^{-0{,}005}_{+0{,}002}$ *см*, $K = 8{,}74 \cdot 10^6$ *кг/см*, подшипники—№ 304. Данные о подшипниках взяты из [5].

Средние квадратические отклонения определялись в предположении, что поле допуска $2\delta_i = 6\sigma$.

Уменьшение радиального зазора подшипника принимаем равным 0,7 от натяга при посадке на вал.

Параметры рассчитанных величин сведены в таблицу.

Таблица

Наименование величин	Среднее	Среднее квадратическое отклонение
Начальный радиальный зазор	$m_1 = 17$	$\sigma_1 = 2{,}33$
Изменение радиального зазора от изменения диаметра внутреннего кольца	$m_2 = -3{,}5$	$\sigma_2 = 1{,}16$
Изменение радиального зазора от изменения диаметра вала . .	$m_3 = -6{,}65$	$\sigma_3 = 1{,}75$
Значение радиального зазора подшипника в сборе	$m_x = 6{,}85$	$\sigma_x = 3{,}14$
Изменение диаметра наружного кольца подшипника	$m_4 = 4{,}5$	$\sigma_4 = 1{,}5$
Изменение диаметра посадочного отверстия в щите	$m_5 = 4{,}5$	$\sigma_5 = 3{,}84$
Зазор между наружным кольцом подшипника и щитом . . .	$m_y = 9$	$\sigma_y = 4{,}12$
Воздушный зазор	$m_\delta = 2{,}65$	$\sigma_\delta = 11{,}7$

$$m_u = m_\delta - m_x - m_y = 2{,}49 \cdot 10^{-2} \text{ см},$$

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_\delta^2} = 0{,}128 \cdot 10^{-2} \text{ см}.$$

Смещение и эксцентриситет, при которых происходит задевание [6],

$$e_0 = 2{,}44 \cdot 10^{-2} \text{ см},$$

$$\varepsilon_0 = \frac{e_0}{m_\delta} = 0{,}921.$$

По фактическому q и ε_0 из рис. 2 находим D. Например, для $q = 1\,\%$, $D = 0{,}105$.

Среднее значение эксцентриситета для данной партии машин

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{\pi D}{2}} = 0{,}406.$$

Поправка $\Delta\varepsilon$ находится по формулам (11,14—20).

$$\Delta\varepsilon = 0{,}0017.$$

Значение ε_0' с учетом колебаний вышеуказанных величин

$$\varepsilon_0' = \varepsilon_0 - \Delta\varepsilon = 0{,}9193.$$

Долю машин, имеющих допустимый по нормам эксцентриситет $\varepsilon \leqslant 0{,}15$, рассчитываем по формуле (10)

$$q' = 0{,}1034 = 10{,}3\,\%.$$

Выводы

1. Предложенная методика позволяет определять среднее и закон распределения эксцентриситета по данным испытательной станции о числе задеваний ротора за статор для данной партии машин, что, в свою очередь, позволяет правильно учитывать в расчетах фактическую величину эксцентриситета.

2. Зная скорость увеличения радиального зазора подшипника, можно прогнозировать задевание ротора за статор в процессе эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Воскресенский. Влияние неравномерности воздушного зазора на характеристики асинхронных двигателей. Вестник электропромышленности, № 5, 1957.
2. Б. В. Гнеденко. Курс теории вероятностей. Физматгиз, 1961.
3. А. П. Воскресенский. Одностороннее магнитное притяжение в асинхронных двигателях. Вестник электропромышленности, № 4, 1958.
4. А. Е. Алексеев. Конструкция электрических машин. ГЭИ, 1958.
5. Подшипники качения. Справочное пособие. Под ред. Н. А. Спицына и А. И. Спришевского, Машгиз, 1961.
6. Н. А. Бородачев. Основные вопросы теории точности производства. Издательство АН СССР, 1950.
7. Д. Коуден. Статистические мтеоды контроля качества. Физматгиз, 1961.
8. Х. Б. Кордонский. Приложение теории вероятностей в инженерном деле. Физматгиз, 1963.
9. Л. Г. Рубо. Пересчет и ремонт асинхронных двигателей мощностью до 100 квт. ГЭИ, 1960.