

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

О. П. МУРАВЛЕВ, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Точность изготовления электрических машин является важным показателем, характеризующим качество. Под точностью следует понимать степень соответствия параметров изготовленной машины заданным расчетным параметрам.

Выходными параметрами асинхронного двигателя считаем пусковой и максимальный моменты, пусковой ток, к. п. д. и $\cos\phi$, входными — число витков обмотки статора w_1 , диаметр провода $d_{пр}$, длину витка l_m , удельное сопротивление алюминия ротора ρ_{Al} , величину воздушного зазора δ , длины сердечников ротора l_2 и статора l_1 , число стержней ротора z_2 и сумму потерь в стали и механических $P_{ст} + P_{мех}$.

Существует два метода расчета допусков: расчет по предельным отклонениям (метод «максимума — минимума») и вероятностный метод [1]. Вероятностный метод является более точным. Применяя этот метод, делаем следующие допущения.

1. Закон распределения погрешностей входных и выходных параметров нормальный, что действительно выполняется на практике для выбранных нами параметров. Половина поля допуска δ_i связана со стандартным отклонением σ_i соотношением

$$\sigma_i = 3 \sigma_{i.} \quad (1)$$

2. Центры группирования погрешностей совпадают с расчетными значениями параметров, измененными на систематическое смещение в случае несимметричного допуска. Для проведения расчетов δ_i берутся в процентах от номинального значения соответствующего параметра.

Для определения допусков могут быть использованы уравнения погрешностей.

В общем виде входные и выходные параметры связаны выражением

$$y_i = f(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m), \quad (2)$$

где y_i — входной параметр,

x_i — выходной параметр.

Система уравнений для расчета допусков методом максимума — минимума в векторной форме имеет вид:

$$\bar{\delta}_y = \bar{C} \bar{\delta}_x, \quad (3)$$

где $\bar{\delta}_y$ — l -мерный вектор допусков выходных параметров;
 $\bar{\delta}_x$ — m -мерный вектор допусков входных параметров;
 C — матрица коэффициентов влияния входных параметров на выходные.

Значения коэффициентов матрицы C можно определить аналитически:

$$c_{ij} = \frac{\partial f_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m)}{\partial x_j} \cdot \frac{x_j}{f_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m)}. \quad (4)$$

При расчете допусков вероятностным методом применяется квадратическое сложение величин, характеризующих рассеяние. Система уравнений в векторной форме имеет вид:

$$(\bar{\delta}_y^2) = F(\bar{\delta}_x^2), \quad (5)$$

где $(\bar{\delta}_y^2)$ — l -мерный вектор квадрата допусков выходных параметров;
 $(\bar{\delta}_x^2)$ — m -мерный вектор квадрата допусков входных параметров.
 Коэффициенты матрицы F

$$f_{ij} = c_{ij}^2. \quad (6)$$

Значения δ_{x_i} могут быть определены путем статистической обработки производственных погрешностей выпускаемых машин. Ниже приводятся данные по разбросу входных параметров для ряда двигателей серий А (АО) и АО2, выпускаемых на заводе «Сибэлектромотор».

На разброс средней длины витка обмотки статора влияет отклонение размеров шаблона в поле допуска от расчетного значения, различное натяжение и укладка витков при намотке секций. Половина поля допуска для средней длины витка обмотки

$$\delta_{l_m} = 0,80 \dots 1,20\%,$$

причем большие значения относятся к двигателям меньшей мощности.

Отклонение диаметра провода, применяемого для обмотки статора, определяется допускаемыми отклонениями, которые узаконены стандартами (ГОСТ 2112—62 «Проволока медная круглая электротехническая» и ГОСТ 6132—62 «Проволока алюминиевая»).

Разброс числа витков обмотки статора можно определить расчетным путем, зная отклонения r_1 , $d_{пр}$, l_m и удельного сопротивления обмотки статора ρ . Для определения рассеивания r_1 были проведены измерения омического сопротивления обмотки статора на постоянном токе по 100 образцов каждого типоразмера. Значения δ_{r_1} колеблются в пределах 3,3...6,5%. Большие значения относятся к алюминиевым обмоткам.

Сопротивление обмотки статора

$$r_1 = \rho \frac{4 w_1 l_m}{\pi d_{пр}^2}. \quad (7)$$

Принимая во внимание выражение (4), можно записать

$$\delta_{r_1}^2 = \delta_{w_1}^2 + \delta_{l_m}^2 + 4\delta_{d_{пр}}^2 + \delta_{\rho}^2,$$

откуда

$$\delta_{w_1}^2 = \delta_{r_1}^2 - \delta_{l_m}^2 - 4\delta_{d_{пр}}^2 - \delta_{\rho}^2. \quad (8)$$

По формуле (8) подсчитывается δ_{w_1} для любого асинхронного двигателя. Для двигателей 3—4 габаритов серий АО и АО2 $\delta_{w_1} = 0 \dots 2,0\%$. Величина $\delta_{\rho} \cong 2,25\%$ [2].

Длины пакетов статора и ротора измерялись в двух взаимноперпендикулярных направлениях у двигателей 3, 4, 6 габаритов серии АО и 3 и 4 габаритов серии АО2. Результаты измерений показывают, что рассеяние l_1 и l_2 существенно не зависит от диаметра пакета и превышает установленные допуски у всех рассмотренных двигателей.

По опытным данным методом наименьших квадратов получены зависимости

$$\delta_{l_1} = 5,88 - 0,0173 l_1 \%, \quad (9)$$

$$\delta_{l_2} = 7,07 - 0,0347 l_2 \%, \quad (10)$$

где l_1 и l_2 в мм.

Для изготовления короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей нормального исполнения применяется алюминий марки А1, удельное сопротивление ρ_{A1} которого контролируется косвенно путем определения количества примесей (железа и кремния), что гарантирует поддержание величины ρ_{A1} с точностью $\pm 8,0\%$. На величину ρ_{A1} существенно влияют пульверизация металла, способствующая образованию воздушной пористости, и отсутствие рафинировки металла, которая удаляет неметаллические примеси и поглощенные газы. Поэтому разброс ρ_{A1} значительно превышает $\pm 8\%$.

С достоверностью не менее 0,99 можно считать $\delta_{\rho_{A1}} = \delta_{r_2}$. Величину действительного поля допуска сопротивления ротора $2\delta_{r_2}$ определяем по результатам контрольных измерений мощности и тока короткого замыкания P_k и I_k . Сопротивление короткого замыкания

$$r_k = c_1 r_1 + c_1^2 r_2' = \frac{P_k}{3 I_k^2}, \quad (11)$$

$$\delta_{r_k}^2 = \left(\frac{c_1 r_1}{r_k} \right)^2 \delta_{r_1}^2 + \left(\frac{c_1^2 r_2'}{r_k} \right)^2 \delta_{r_2'}^2, \quad (12)$$

Откуда

$$\delta_{r_2'}^2 = \frac{\delta_{r_k}^2 - \left(\frac{c_1 r_1}{r_k} \right)^2 \delta_{r_1}^2}{\left(\frac{c_1^2 r_2'}{r_k} \right)^2}, \quad (13)$$

где c_1 , r_1 — расчетные значения, $\delta_{r_1} = 5,38\%$ — с учетом рассеяния r_1 и колебания температуры обмотки в интервале $15 \dots 25^\circ\text{C}$.

На основании обработки результатов контрольных испытаний получена зависимость для двигателей мощностью $1,0 \dots 7,5$ кВт:

$$\delta_{\rho_{A1}} = 45,5 - 2,05 P_n, \quad (14)$$

где P_n — номинальная мощность двигателя, кВт.

Величина воздушного зазора δ асинхронных электродвигателей малой и средней мощности практически не контролируется из-за большой трудоемкости или невозможности измерений. Однако о величине разброса δ можно судить по величине тока холостого хода I_0 , который измеряется при контрольных испытаниях. Статистическая обработка полученных результатов для двигателей 3...6 габаритов серии А (АО) и 3...4 габаритов серии АО2 позволяет определить величину действительного разброса.

$$\delta_\delta = 12,0 \dots 15,0\% \text{ для } 2p = 2,$$

$$\delta_\delta = 13,5 \dots 18,5\% \text{ для } 2p > 2.$$

Большие значения относятся к двигателям меньшей мощности. Потери в стали $P_{ст}$ и механические $P_{мех}$ не разделяем по следующим причинам:

1. Законы распределения потерь в стали и механических отличаются от нормального, а сумма $P_{ст} + P_{мех}$ обычно имеет нормальное распределение.

2. Рассеивание $P_{ст} + P_{мех}$ можно вычислить по результатам контрольных испытаний.

Потери холостого хода

$$P_0 = P_{мо} + P_{ст} + P_{мех}, \quad (15)$$

где $P_{мо} = 3 I_0^2 r_1$ — потери в обмотке статора в режиме холостого хода. На основании выражения (15)

$$\delta_{P_{ст}+P_{мех}}^2 = \frac{\delta_{P_0}^2 - \left(\frac{P_{мо}}{P_0}\right)^2 \delta_{P_{мо}}^2}{\left(\frac{P_{ст} + P_{мех}}{P_0}\right)^2}, \quad (16)$$

где

$$\delta_{P_{мо}}^2 = 4 \delta_{I_0}^2 + \delta_{r_1}^2;$$

δ_{P_0} , δ_{I_0} , P_0 и $P_{ст} + P_{мех}$ определяются по данным контрольных испытаний.

Для двигателей 3 и 4 габаритов серий АО и АО2 методом наименьших квадратов получена зависимость

$$\delta_{P_{ст}+P_{мех}} = 60 - 0,59 (P_{ст} + P_{мех}). \quad (17)$$

Учитывая, что брак от плохой заливки ротора небольшой — порядка 0,05%, можно считать $\delta_{z_3} = 0$.

Таким образом, получены данные по разбросу входных параметров асинхронных электродвигателей, которые могут быть использованы для поверочного расчета допусков. Предложенная методика расчета допусков и определения разброса параметров может быть использована для любой электрической машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Бородачев. Анализ качества и точности производства. Машгиз, 1946.
2. Е. К. Ганусевич, Л. З. Реут. Омическое сопротивление эмальпроводов. «Электротехника», 1964. № 6.