ИЗНОС ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ, А. С. ГИТМАН

Одной из основных задач технического прогресса является повышение надежности оборудования и, в частности, самого распространенного типа привода — асинхронных двигателей. Очевидно, что надежность асинхронных двигателей может быть повышена путем улучшения качества применяемых для изготовления материалов (в первую очередь изоляционных) и улучшения качества изготовления. Вместе с тем, возможен другой путь — поиск резервов для построения достаточно надежной системы из ненадежных элементов. Если учесть, что качество материалов и изготовления не может быть повышено скачкообразно, то второй путь уже в настоящее время может явиться радикальным средством повышения надежности.

В этой связи представляют интерес исследования, проведенные в Томском политехническом институте, которые выявили значительную корреляционную связь между величиной коэффициента заполнения паза всыпных обмоток и величиной пробивных напряжений изоляции. Отсюда следует вывод, что одним из резервов повышения надежности является уменьшение коэффициента заполнения паза и, соответственно, уменьшение сечения обмоточного провода. Для двигателей, работающих с переменной нагрузкой, при наличии корреляционных функций нагрузки можно найти такое сечение провода, что износ изоляции при фактической переменной нагрузке будет равен износу изоляции при номинальном расчетном режиме, т. е. так, как было предложено для кабельных изделий в [1].

Целью настоящей статьи является исследование только величины фактического износа изоляции асинхронных двигателей, установленных на металлорежущем оборудовании по статистическим данным [2]. Процесс изменения нагрузки предполагается стационарным в смысле, принятом в теории случайных функций.

Ресурс изоляции двигателя τ в процессе эксплуатации определяется выражением:

$$\tau(t) = \tau_0 \exp\left(-\frac{t}{T}\right) - t \exp[b(\Delta\theta_{дв} + \theta_{окр} - \theta_{доп})], \quad (1)$$

где τ_0 — заводской начальный ресурс,

t — время эксплуатации,

$\Delta\theta_{дв}$ — превышение температуры обмотки двигателя над температурой окружающей среды,

$\theta_{окр}$ — температура окружающей среды,

$\theta_{доп}$ — максимально допустимая температура для данного класса изоляции,

T — постоянная времени естественного старения изоляции,
 b — коэффициент, зависящий от класса изоляции.

Исключая из рассмотрения естественное старение изоляции, найдем математическое ожидание износа изоляции в период эксплуатации в единицу времени. Учитывая, что величина $\Delta\Theta_{дв}$ и $\Theta_{окр}$ стохастически независимы, получим:

$$\begin{aligned} M[r(t)] &= M\{\exp[b(\Delta\Theta_{дв} + \Theta_{окр} - \Theta_{доп})]\} = \\ &= \exp[-b\Theta_{доп}] \cdot M\{\exp(b\Delta\Theta_{дв} + \Theta_{окр})\} = \\ &= \exp[-b\Theta_{доп}] \cdot M[\exp(b\Delta\Theta_{дв})] M[\exp(b\Theta_{окр})]. \end{aligned} \quad (2)$$

Для вычисления $M[\exp(b\Delta\Theta_{дв})]$ необходимо найти плотность вероятности $\Delta\Theta_{дв}$, или плотность вероятности другой переменной, связанной с $\Delta\Theta_{дв}$ функциональной зависимостью.

По данным [2], плотность вероятности использованной мощности асинхронных двигателей, установленных на металлорежущем оборудовании, можно представить показательным законом распределения

$$\varphi(P) = \lambda \exp(-\lambda P), \quad (3)$$

где P — мощность в долях от номинальной,
 λ — параметр распределения.

Так как пересчет перегрева обмоток производится по квадрату тока, найдем зависимость тока от мощности. Введем вначале систему относительных единиц, исходя из значений тока и мощности при номинальной нагрузке:

$$P_{ном} = i_{ном} = 1 \quad (4)$$

Для двигателей, установленных на металлорежущем оборудовании, при учете защиты от перегрузок изменение мощности происходит в пределах от 0 до 1,1. При этом ток изменяется от значения тока холостого хода i_0 до 1,1. Для нахождения функциональной зависимости $i=f(P)$ достаточна квадратичная аппроксимация.

Исходя из граничного условия

$$P=0, i=i_0;$$

получим общий вид уравнения

$$i = i_0 + a_1 P + a_2 P^2 \quad (5)$$

Используя второе граничное условие

$$P=1,1, i=1,1$$

и условие $P_{ном} = 1, i_{ном} = 1$, получим систему уравнений для нахождения коэффициентов a_1 и a_2 .

$$\begin{cases} i_0 + a_1 + a_2 = 1 \\ i_0 + 1,1a_1 + 1,21a_2 = 1,1 \end{cases} \quad (6)$$

Из (6) получаем

$$a_1 \approx 1 - 2i_0; a_2 \approx i_0.$$

Уравнение (5) преобразуется к виду:

$$i = i_0 + (1 - 2i_0)P + i_0 P^2 \quad (7)$$

или

$$i = P + i_0 (P - 1)^2 \quad (8)$$

Зная перегрев обмотки двигателя при номинальном токе $\Delta\Theta_{ном}$, можно получить перегрев для другого нагрузочного тока:

$$\Delta\Theta_{дв} = \left(\frac{i}{i_{ном}}\right)^2 \Delta\Theta_{дв.ном} = i^2 \Delta\Theta_{дв.ном}. \quad (9)$$

Подставляя в (9) значение i из (8), получим:

$$\Delta\Theta_{дв} = [P + i_0 (P - 1)^2]^2 \Delta\Theta_{дв.ном}. \quad (10)$$

Получив $\Delta\Theta_{дв}$ в виде (10) и зная плотность вероятности используемой мощности (3), можно найти

$$M[\exp(b \Delta \Theta_{дв})] = J = \lambda \int_0^{1,1} \exp\{b \Delta \Theta_{дв.ном} [P + i_0(P-1)^2]\} e^{-\lambda P} dP \quad (11)$$

Хотя распределение (3) является усеченным, нормирующим множителем можно пренебречь, так как в соответствии с [2] параметр распределения $\lambda \geq 3$. Заменяя произведение постоянных b и $\Delta\Theta_{дв.ном}$ через K , преобразуем (11).

Вычислим $M[\exp(b\Theta_{окр})]$. Принимая, что изменение температуры цехах, где расположено металлорежущее оборудование, подчиняется нормальному закону с параметрами $\bar{\Theta}_{окр}$ и δ , получим

$$M[\exp(b\Theta_{окр})] = \exp\left[b \left(\bar{\Theta}_{окр} + \frac{b\sigma^2}{2} \right) \right]. \quad (12)$$

Таким образом, математическое ожидание износа изоляции (2) в единицу времени составляет

$$M = \exp[-b\theta_{доп}] \cdot M[\exp(b \Delta \Theta_{дв})] \cdot M[\exp(b\Theta_{окр})] = J \exp\left[b \left(\bar{\Theta}_{окр} - \theta_{доп} + \frac{b\sigma^2}{2} \right) \right], \quad (13)$$

где J — определяется по формуле (11).

С учетом (13) формула (1) принимает вид:

$$r(t) = r \exp\left[-\frac{t}{T}\right] - Mt. \quad (14)$$

Приравняв в (14) $r(t)$ нулю и решив уравнение относительно t , найдем срок службы изоляции

$$r \exp\left(-\frac{t}{T}\right) - Mt = 0 \quad (15)$$

Разлагая $\exp\left(-\frac{t}{T}\right)$ в ряд и ограничиваясь двумя членами разложения, получим

$$t = \frac{1}{\frac{1}{T} + \frac{M}{r}}. \quad (16)$$

Нетрудно показать, что для нашего случая износ изоляции почти не зависит от температуры обмотки статора. Без учета естественного износа срок службы изоляции определяется выражением

$$t = \frac{1}{M} \quad (17)$$

Принимая $r = 10000$ час, $\Theta_{доп} = 105^\circ \text{C}$, $\Theta_{окр} = 20^\circ \text{C}$, $\sigma = 5^\circ \text{C}$, $k = 6$, $\lambda = 5$, $i_0 = 0,5$, получим

$$M = 9,73 \exp\left[0,0866 \left(20 - 105 + \frac{0,0866 \cdot 5^2}{2} \right) \right] = \frac{10000}{6,8 \cdot 10^{-3}} = 1,47 \cdot 10^6 \text{ часов} \approx 170 \text{ лет.}$$

В [2] на основе изучения работы большого парка металлорежущего оборудования было найдено, что средняя нагрузка асинхронных двига-

телей составляет около 0,2 от номинальной ($\lambda=5$), и делается вывод, что в ближайшее время повышение номинальной мощности электродвигателей главного привода универсальных токарных и фрезерных станков нецелесообразно. С точки зрения электромашиностроения при учете низкой надежности выпускаемых в настоящее время двигателей можно сделать другие выводы:

1. В двигателях, поставляемых для станкостроительной промышленности, может быть значительно уменьшен диаметр обмоточного провода. Для этих двигателей не представляет опасности повышенный нагрев при номинальной нагрузке, даже если этот нагрев будет превышать допустимый для данного класса изоляции.

2. При уменьшении диаметра обмоточного провода может быть повышена надежность либо за счет уменьшения коэффициента заполнения паза, либо за счет усиления изоляции при сохранении коэффициента заполнения.

3. Должна быть откорректирована методика расчета оптимальных параметров асинхронных двигателей. Она должна учитывать надежность и низкую среднюю нагрузку в процессе эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Х. И. Бракманн. Определение расчетного максимума по условиям теплового износа изоляции проводников. «Электричество», № 3, 1965.
2. Р. М. Пратусевич. Эксплуатационные режимы нагружения универсальных станков, Станки и инструмент, № 6, 1960.