

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рогозин Г.Г., Пятлина Н.Г.

Донецкий национальный технический университет
rgg@elf.dgtu.donetsk.ua

The new approach for determination of the efficiency probabilistic characteristics being required for diagnostic check of IMs eccentricity is given. The method is based on the data air gap eccentricity being measured at the field maintenance of in IM. Recommendation are suggested for implementation of the method by transition from the guarantee characteristics to the probabilistic ones. In the process the synchronous reactance of the motionless IM or the transient time constant of the damping leakage fluxes magnetic induction outside the IM from the electric supply are used.

Полученная на основе оптимизационного анализа математической модели измерения неравномерности воздушного зазора (НВЗ) асинхронных двигателей характеристика работоспособности [1] в форме зависимости предельно допустимых величин синхронного индуктивного сопротивления от максимальных величин эксцентриситета или в форме зависимости величины постоянной времени изменения индукции магнитных полей рассеяния вне корпуса машины в опыте кратковременного отключения от источника питания [2] позволяют (в пределах влияния погрешности измерения) осуществлять гарантированный контроль НВЗ. Использование первой из указанных характеристик (кривая 1 рис. 1) для контроля эксцентриситета

$$\varepsilon = \frac{\delta_{\min} - \delta_{\text{ср}}}{\delta_{\text{ср}}},$$

где δ – величина воздушного зазора между ротором и статором, обеспечивает теоретически стопроцентную надежность, так как вероятность сочетания значений координат эксцентриситета в торцевых частях ротора статора машины, при которых наступает минимум диагностического параметра при заданной макси-

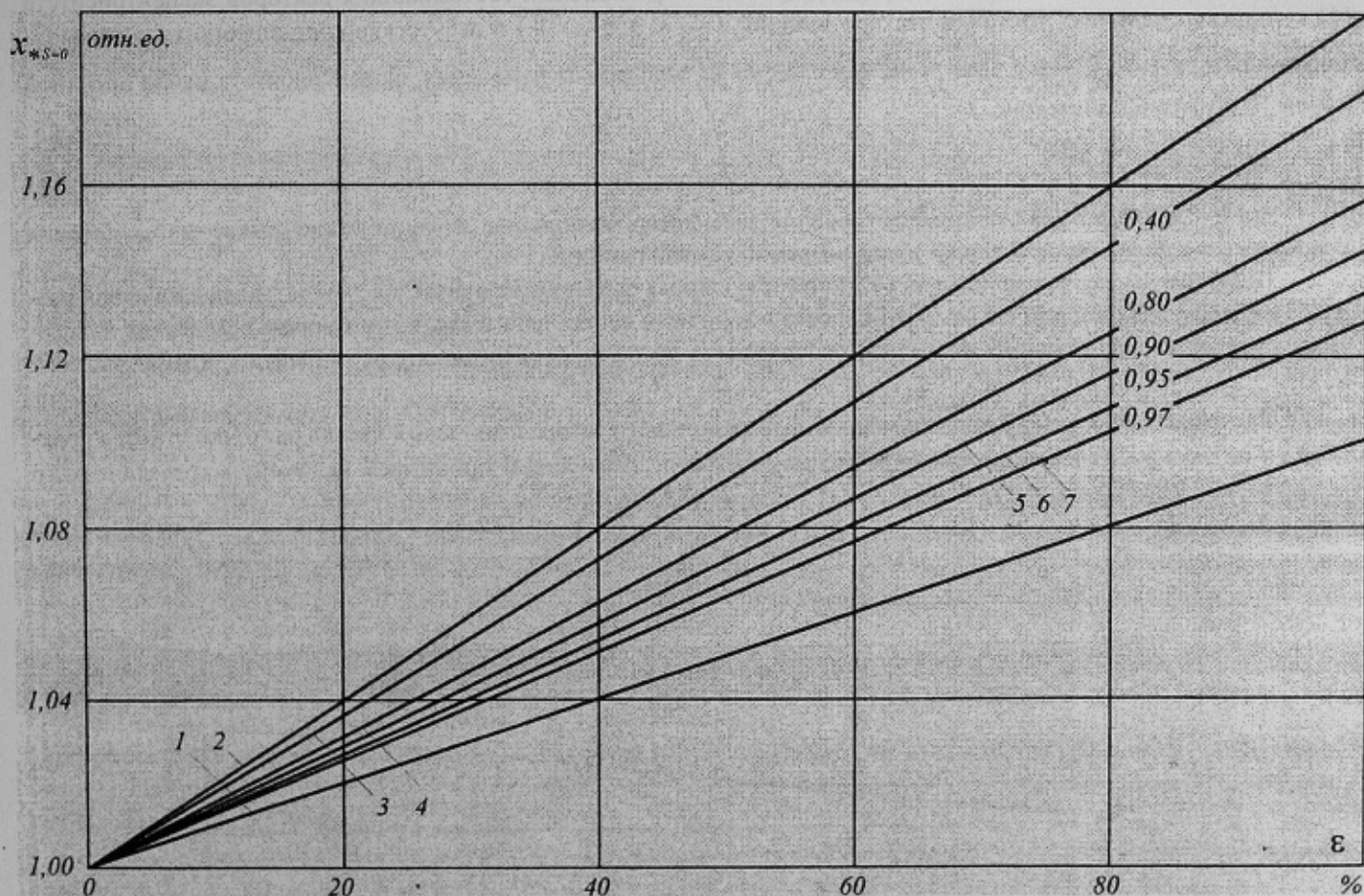


Рисунок 1 – Характеристики контроля неравномерности воздушного зазора

1 – минимум $x_{*s=0}(\varepsilon)_{\varepsilon_1(\varepsilon_2)=\varepsilon_{\max}}$; 2 – базовая, $x_{*s=0}(\varepsilon)_{\varepsilon_1=\varepsilon_2}$; 3-7 – вероятностные с надежностью 0,4-0,97.

1404797

мальной величине эксцентриситета, практически равна нулю.

Минимальный уровень надежности контроля соответствует случаю использования в целях диагностики НВЗ базовой характеристики (кривая 2 рис. 1), определяемой экспериментально при параллельном смещении оси ротора относительно оси расточки статора.

Очевидно, что применение для контроля НВЗ первой из указанных характеристик приводит к снижению чувствительности используемого диагностического параметра, а применение второй – недопустимо по величине надежности. В этой связи возникает задача на основе анализа статистических данных измерения воздушного зазора в процессе эксплуатации асинхронных двигателей различных типоразмеров перейти от гарантированных характеристик контроля НВЗ к вероятностным, учитывающим факторы, связанные с особенностями конструкции машин, а в ряде случаев – влиянием приводимого механизма.

Решение указанной задачи, практически за исключением случая высоковольтных асинхронных двигателей с выносными подшипниками скольжения, требует проведения подготовительных работ конструктивного характера, обеспечивающих измерение эксцентриситета с помощью специальных щупов со стороны торцевых щитов. К недостаткам экспериментального пути получения вероятностных характеристик работоспособности асинхронных двигателей следует отнести не только значительные затраты трудовых ресурсов и времени для проведения статистических испытаний, но и отсутствие возможности наблюдения для многих агрегатов достаточно представительных однотипных выборок.

В указанной связи, а также учитывая возможность оснащения промышленных предприятий опытными образцами устройств для косвенного контроля НВЗ, в настоящей статье рассматривается методика расчета вероятностных характеристик работоспособности, основанная на анализе характера изменения НВЗ некоторых асинхронных двигателей. Отметим, что вероятностные оценки нашли применение, например, при использовании виброакустических измерений при диагностике распушения крайних пакетов сердечника статора гидрогенераторов [3].

Рассмотрим методику расчета вероятностных характеристик работоспособности на основе принятия допущения о доминантном смещении оси ротора относительно оси расточки статора в направлении сил гравитационного поля. Указанная особенность соответствует физическим представлениям об основных причинах возникновения НВЗ, связанных с абразивном износом подшипников, деформацией щитов и замков станин и подтверждается результатами метрических измерений воздушного зазора в торцевых частях крупных высоковольтных асинхронных двигателей механизмов собственных нужд тепловых электрических станций. Следствием указанного допущения является совпадение знаков вертикальных составляющих векторов эксцентриситета [1] в торцевых сечениях расточки статора машины ($\varepsilon_{1y} < 0, \varepsilon_{2y} < 0$) и отсутствие составляющих по горизонтальной оси ($\varepsilon_{1x} = \varepsilon_{2x} = 0$). При этом, как следует из диаграммы изменения эксцентриситета вдоль активной длины (l) ротора машины (рис. 2)

$$\varepsilon(l_j) = \varepsilon_{\max} - \frac{\Delta\varepsilon}{l} l_j \quad (1)$$

где l_j – длина ротора от торцевого сечения, имеющего наибольшее значение эксцентриситета, до сечения j ; измеряется в долях полной длины l , принимаемой равной единице.

Полагаем также, что зависящая от многих случайных факторов величина $\Delta\varepsilon$, представляющая собой разность вертикальных координат эксцентриситета в торцевых частях двигателя, возникающая вследствие износовых, постепенно действующих факторов, распределена по нормальному закону [4]. Отметим, что $\Delta\varepsilon < 0$, если $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$.

Так как отличия между неравномерностями воздушного зазора в торцевых частях расточки статора практически не зависят от влияния приводимого механизма, в дальнейшем принимаем величину математического

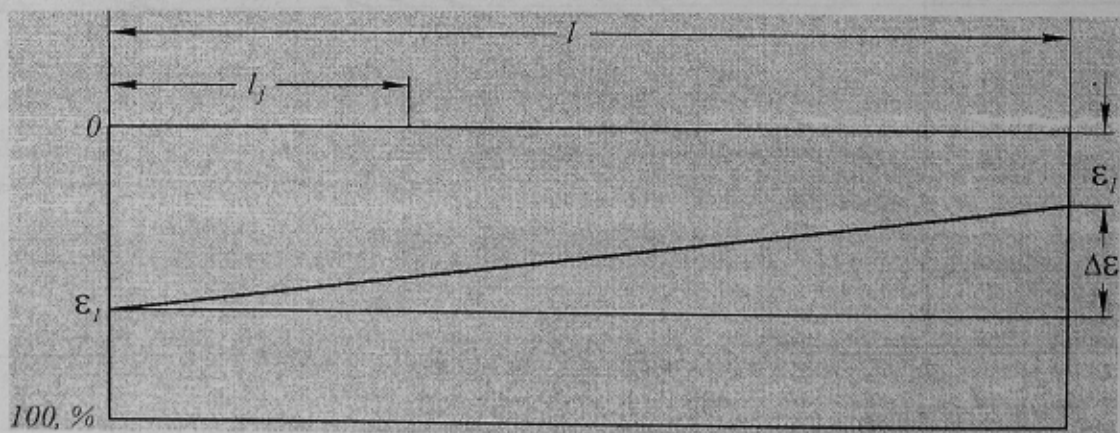


Рисунок 2 – Диаграмма изменения эксцентриситета ротора.

ожидания $\Delta\epsilon$ равной нулю.

С учетом указанных допущений математическая формулировка задачи расчета вероятностных характеристик работоспособности сводится к определению вероятности того, что отклонения истинных значений $\Delta\epsilon$ по абсолютной величине не будут менее заданных ($\Delta\epsilon_{\text{зад}}$) соответствующих критерию работоспособности асинхронных двигателей по величине синхронного индуктивного сопротивления для каждого из максимально допустимых значений эксцентриситета.

Ниже приводятся выражения для определения синхронного индуктивного сопротивления асинхронной машины для заданных значений $\epsilon_{\text{макс}}$, $\Delta\epsilon$ и соответствующих этим сопротивлениям вероятностных характеристик.

Используя математическую модель измерения НВЗ, полученную в [1] в общем виде имеем

$$x_{*s=0, \epsilon \neq 0} = \frac{x_{s=0, \epsilon \neq 0}}{x_{s=0, \epsilon=0}} = 1 + \int_0^l [h_1 \epsilon(l_j) + h_2 \epsilon^2(l_j) + \dots + h_m \epsilon^n(l_j)] dl_j, \quad (2)$$

где h_1, h_2, \dots, h_m - коэффициенты базовой характеристики диагностического параметра

$$x_{*s=0, \epsilon_1=\epsilon_2} = 1 + h_1 \epsilon + h_2 \epsilon^2 + \dots + h_m \epsilon^m. \quad (3)$$

После подстановки (1) в (2) и интегрирования получим

$$x_{*s=0, \epsilon \neq 0} = 1 + \frac{l}{\Delta\epsilon} \sum_{k=1}^m \frac{h_k}{k+1} \left[\epsilon_{\text{макс.зад}}^{k+1} - (\epsilon_{\text{макс.зад}} - \Delta\epsilon)^{k+1} \right] \quad (4)$$

Надежность определения диагностического параметра $x_{*s=0, \epsilon \neq 0}$, равная

$$p(-\Delta\epsilon_{\text{зад}} < \Delta\epsilon < \Delta\epsilon_{\text{зад}})_{\epsilon_{\text{макс.зад}}}$$

определяется выражением

$$\Phi\left(\frac{-\Delta\epsilon_{\text{зад}} - \Delta\epsilon}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\Delta\epsilon_{\text{зад}} - \Delta\epsilon}{\sigma}\right) = 2\Phi\left(\frac{\Delta\epsilon_{\text{зад}}}{\sigma}\right), \quad (5)$$

где $\Phi(\Delta\epsilon_{\text{зад}}, \sigma)$ нормальная функция распределения $\Delta\epsilon$;

σ - дисперсия $\Delta\epsilon$.

Выражение (5) учитывает возможные направления знака неравенства между ϵ_1 и ϵ_2 .

Как известно, экспериментальная базовая характеристика (3) для синхронного индуктивного сопротивления асинхронных двигателей, имеющих число пар полюсов больше двух, имеет универсальный характер [5] с параметрами

$$h_1 = 0,2; h_2 = h_3 = \dots = h_n = 0$$

В указанной связи вероятностные характеристики для контроля НВЗ асинхронных двигателей по величине рассматриваемого диагностического параметра могут быть рассчитаны заранее. При этом соответствие между величиной последнего и отличием между неравномерностями воздушного зазора в торцевых частях ротора статора устанавливается по соотношению (4).

В качестве примера на рис. 1 (кривые 3-7) показаны вероятностные характеристики асинхронных машин, соответствующие надежностям в пределах от 0,40 до 0,97. При выполнении расчета по (5) учитывалось, что реализация различных положений ротора в расточке статора при НВЗ происходит практически только в пределах утроенных значений дисперсий отклонений эксцентриситета. Поэтому вероятностные характеристики работоспособности, гарантирующие с определенным уровнем надежности не превышение заданных максималь-

ных величин эксцентриситета, отражают условие $\varepsilon_{\text{макс.зад.}} = 3\sigma$. В частности, при определении критического условия по величине диагностического параметра, соответствующего $\varepsilon_{\text{макс.зад.}} = 50\%$ величина отклонения эксцентриситета не может быть более 0,5 д.е., а дисперсия соответственно 0,165 д.е.

Характеристика, построенная при техническом уровне надежности $p = 0,95$ (кривая 6 рис. 1), может быть принята в качестве нижней границы области ОАВА наблюдаемых значений максимальных величин эксцентриситета при контроле НВЗ по диагностическому параметру $x_{*s=0}$.

Как следует из рис. 1 при измеренной величине синхронного индуктивного сопротивления равной 1,1, являющейся критической в соответствии с кривой I, учет вероятностного характера проявления НВЗ позволяет отказаться от принятия оперативного решения о немедленном выводе в ремонт асинхронной машины. В рассматриваемом случае с надежностью равной 0,95 можно утверждать, что величина эксцентриситета не превышает 75%. Приведенные вероятностные характеристики работоспособности целесообразно также использовать при внедрении способа контроля НВЗ [6], основанного на определении, постоянной времени (Т) затухания переходных токов в роторе при отключении асинхронного двигателя от сети.

Как показали исследования, проведенные для ряда высоковольтных машин, базовая характеристика T_* с погрешностью не более двух процентов отличается от базовой характеристики $x_{*s=0}$. Поэтому при наличии устройств, позволяющих по данным регистрации ЭДС вращения на выбеге асинхронных машин при $\varepsilon < 0,5U_{\text{ном}}$ (с целью исключения влияния насыщения и вытеснения тока в стержнях ротора) определять постоянную времени обмотки ротора при НВЗ, возможности косвенного контроля по рассматриваемым характеристикам значительно расширяются.

Величина постоянной времени, не зависящая от интенсивности регистрируемого сигнала, при этом может определяться по исходной информации в виде ЭДС, наводимой на выводах измерительной обмотки Индукционного датчика расположенного в зоне действия полей рассеяния ротора машины или датчика Холла.

Эффективность использования вероятностных характеристик должна проявиться и при использовании диагностических параметров в форме индуктивных сопротивлений нулевой последовательности и короткого замыкания, имеющих нелинейные базовые характеристики и более низкую чувствительность диагностического параметра при значениях $\varepsilon < 50\%$.

Вывод.

Применение вероятностных характеристик работоспособности позволит повысить эффективность контроля НВЗ по величине синхронного индуктивного сопротивления, измеряемого на неподвижных асинхронных двигателях, или по величине постоянной времени затухания полей рассеяния вне корпуса асинхронной машины при переходном процессе кратковременного отключения от сети рабочего напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рогозин Г.Г., Лапшина Н.С. Контроль равномерности воздушного зазора асинхронной машины по значению синхронного индуктивного сопротивления. // *Электричество*. – 1981. – №11. – С. 44-46.
2. Rogozin G.G. Impact Of The Air Gap Eccentricity On The Leakage Flux Change Outside The Im Frame During Run-Out Of The Motor After Disconnection From The Supply. – Short Papers Proceedings, 1st Vol.; Session W1B, pp. 1-4; SPEEDAM'04, June 16-18, 2004, Capri, Italy.
3. Бивер Л.А., Боровков А.Г., Карпин Я.А. и др. Виброакустические методы оценки состояния крайних пакетов сердечника статора мощного гидрогенератора. // *Электрические станции*. – 1983. – № 12. – С. 48-50.
4. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
5. Рогозин Г.Г., Лапшина Н.С. Косвенный контроль неравномерности воздушного зазора асинхронных машин. // *Электротехника*. – 1980. – № 3. – С. 27-30.
6. А.с. № 900226 (СССР). Способ косвенного контроля неравномерности воздушного зазора асинхронных двигателей / Рогозин Г.Г., Лапшина Н.С. – Оpubл. в БИ № 3, 1982.

Рекомендовано проф., д.т.н. Дудник М.З.