

ОСВОЕНИЕ И ОЦЕНКА МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РОТОРА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Описано экспериментальное исследование двух методов электромагнитной диагностики относительного эксцентриситета ротора асинхронных двигателей: по значению ЭДС системы измерительных катушек и по значению потенциала нейтральной точки звезды обмотки статора. Показано, что данные методы обладают достаточной для практического применения чувствительностью. Из сравнения двух методов сделан вывод о перспективности применения метода измерения потенциала нейтральной точки звезды обмотки статора.

Введение

Для повышения эксплуатационной надежности и срока службы асинхронных двигателей необходимо своевременное выявление (диагностика) неисправностей до возникновения аварийной ситуации. При этом значительно снижается время и стоимость ремонта. Одной из возможных неисправностей асинхронного двигателя является эксцентриситет ротора – смещение оси ротора относительно оси отверстия статора. В общем случае различают статический эксцентриситет (поверхность ротора концентрична относительно его оси вращения) и динамический эксцентриситет (несоосность поверхности ротора относительно его оси вращения). В данной работе рассматривается статический эксцентриситет ротора при параллельном смещении оси ротора относительно оси статора.

При возникновении эксцентриситета ротора воздушный зазор (ВЗ) становится неравномерным по окружности статора, что приводит к возникновению дополнительных гармоник магнитного поля, ухудшающих эксплуатационные характеристики двигателя. Наличие эксцентриситета приводит к появлению силы одностороннего магнитного притяжения, которая, в свою очередь, приводит к прогибу вала (дополнительное увеличение эксцентриситета) и повышенному износу подшипников. При максимальном эксцентриситете ротор двигателя начинает задевать за статор, что может привести к заклиниванию ротора. Кроме того, при задевании ротора о статор происходит сильный местный нагрев последнего в точках касания, что приводит к выходу из строя изоляции и последующим коротким замыканиям в обмотке статора.

Относительный эксцентриситет определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_{\max} + \delta_{\min}}, \quad (1)$$

где δ_{\max} , δ_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значение воздушного зазора в двигателе.

Известны различные методы диагностики эксцентриситета ротора /1/: измерение емкости между ротором и измерительным зондом, создание полюсов остаточной намагниченности, питание одной фазы двигателя и измерение ЭДС других фаз, измерение снижения скорости вращения ротора при однофазном питании (ОСТ 160.688009-71), измерение амплитуды вибрации и вибрационных ускорений деталей двигателя и др.

Из анализа указанных методов можно выделить три различных подхода к определению эксцентриситета ротора:

- механическая диагностика (непосредственное измерение величины воздушного зазора в разных точках);
- вибрационная диагностика;
- электромагнитная диагностика.

Непосредственное измерение ВЗ практически возможно осуществлять на крупных двигателях при условии доступа к торцевой зоне магнитопровода. При этом для проведения измерений необходима остановка двигателя. Непосредственное измерение ВЗ в двигателях малой и средней мощности затрудняется малыми величинами ВЗ.

При наличии эксцентриситета ротора возникают вибрации корпуса двигателя, вызванные появлением дополнительных гармоник магнитного поля. Анализируя спектр, амплитуду и места проявления этих вибраций можно определить величину относительного эксцентриситета (вибрационная диагностика). Основными недостатками этого метода диагностики являются косвенная зависимость вибрации от эксцентриситета и наличие большого числа неопределенных факторов, влияющих на спектр вибрации: конструкция, масса, жесткость станины; физические свойства фундамента; вибрации сопряженного с двигателем механизма и др.

Электромагнитные методы диагностики эксцентриситета основаны на измерении электрических и магнитных величин, зависящих от эк-

сцентриситета. Эти методы позволяют обеспечить более точную диагностику, так как измеряемые величины непосредственно зависят от эксцентриситета.

Различают две группы электромагнитных методов диагностики эксцентриситета:

- методы, связанные с установкой различных датчиков внутри испытуемых машин до их сборки;
- методы, позволяющие измерять эксцентриситет без предварительной установки внутри испытуемых машин дополнительных элементов.

Методы второй группы являются наиболее перспективными, так как позволяют измерять величину эксцентриситета без демонтажа двигателя и без отключения рабочего механизма, что особенно важно для двигателей большой мощности и для установок с непрерывным технологическим процессом. Следует заметить, что методы с установкой внутри машин датчиков позволяют более точно определить величину эксцентриситета.

В одном из методов первой группы (установка внутри машин датчиков) эксцентриситет определяют по ЭДС системы измерительных катушек (метод ЭСК) уложенных в воздушном зазоре /2/. В методе /3/ (относится ко второй группе) эксцентриситет определяют по значению потенциала нейтральной точки (ПНТ) звезды обмотки статора относительно нейтральной точки звезды резисторов.

Магнитное поле в воздушном зазоре двигателя

В общем случае магнитное поле в воздушном зазоре представляет собой сумму рабочей гармоники поля с числом пар полюсов $v = p$, высших и низших гармоник, обусловленных зубчатым строением магнитопроводов статора и ротора, дискретностью расположения проводников обмоток, насыщением магнитной цепи двигателя, а также различными дефектами двигателя, в частности наличием эксцентриситета ротора.

Согласно методу удельной магнитной проводимости ВЗ /1, 4, 5/ магнитное поле в ВЗ определяется выражением:

$$B_{\delta}(\varphi, t) = F(\varphi, t) \Lambda_{\delta}(\varphi, t), \quad (2)$$

где $F(\varphi, t)$ – МДС в ВЗ, в общем случае равная сумме МДС обмотки статора и клетки ротора (поле реакции ротора);

$\Lambda_{\delta}(\varphi, t)$ – удельная магнитная проводимость воздушного зазора (далее ПВЗ), учитывающая влияние зубчатого строения магнитопроводов и неравномерность ВЗ;

φ – угловая координата по внутренней окружности статора.

Согласно /4, 5/ при равномерном ВЗ

$$\Lambda_{\delta}(\varphi, t) = \frac{\mu_0}{\delta_0} \left(\Lambda_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_{zs_k} \cos(kZ_1\varphi) + \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_{zr_k} \cos \left(kZ_2 \left(\varphi - \frac{\omega_1 t(1-s)}{p} \right) \right) \right) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_{zsr_{k,n}} \cos \left((kZ_2 \pm nZ_1)\varphi - kZ_2 \frac{\omega_1 t(1-s)}{p} \right), \quad (3)$$

где δ_0 – номинальный воздушный зазор двигателя;

Λ_0 – относительное значение постоянной составляющей ПВЗ;

$\lambda_{zs}, \lambda_{zr}$ – относительные амплитуды k -х зубцовых гармоник ПВЗ от зубчатости соответственно статора и ротора;

λ_{zsr} – относительные амплитуды интерференционных зубцовых гармоник проводимости, обусловленных взаимным перемещением пазов статора и ротора;

Z_1, Z_2 – числа пазов соответственно статора и ротора;

ω_1 – угловая частота питающего напряжения;

s – скольжение ротора относительно рабочей гармоники поля.

При наличии эксцентриситета ротора в неравномерном воздушном зазоре дополнительно возникают гармоники проводимости, определяемые разложением проводимости неравномерного зазора в ряд Фурье /6/:

$$\Lambda_{\delta\epsilon}(\varphi, t) = \frac{\mu_0}{\delta_0} \sum_{k=1}^{\infty} \Lambda_k \cos(\varphi k), \quad (4)$$

где Λ_k – амплитуда k -ой гармоники ПВЗ.

Выражение (4) является дополнительным слагаемым в формуле (3), кроме того, неравномерный ВЗ влияет также на величины амплитуд зубцовых гармоник $\lambda_{zs}, \lambda_{zr}$ и λ_{zsr} ПВЗ в формуле (3).

Гармоники поля, вызванные дискретным расположением обмоток статора и ротора, создаются высшими гармониками МДС этих обмоток /4/. При этом взаимодействие гармоник поля с обмоткой ротора приводит к появлению дополнительных гармоник МДС ротора, создающих новые гармоники поля в зазоре.

Указанные гармоники поля индуцируют ЭДС в обмотке статора. Для определения эксцентриситета двигателя необходимо измерить величину гармоник ЭДС статора, зависящих от эксцентриситета.

При подстановке формул (3) и (4) в (2) получаем гармоники поля, возникающие при на-

личии эксцентриситета. Если учитывать в формуле (4) только первую составляющую и не учитывать зубцовые гармоники проводимости и гармоники МДС зубцового порядка, то из формулы (2) получаем, что в ВЗ возникают гармоники поля порядка $p \pm 1$ /1/:

при $p > 1$:
$$V_{\delta}(\varphi, t) = -V_{\delta 0} \Lambda_0 [\cos(p\varphi - \omega t) + \frac{\Lambda_1}{2\Lambda_0} D_{p+1} \cos((p+1)\varphi - \omega t) + \frac{\Lambda_1}{2\Lambda_0} D_{p-1} \cos((p-1)\varphi - \omega t)]; \quad (5)$$

при $p=1$:

$$V_{\delta}(\varphi, t) = -V_{\delta 0} \Lambda_0 \left[\left(1 - \left(\frac{\Lambda_1}{2\Lambda_0} \right)^2 \right) \cos(\varphi - \omega t) - \left(\frac{\Lambda_1}{2\Lambda_0} \right)^2 D_1 \cos(\varphi + \omega t) + \frac{\Lambda_1}{2\Lambda_0} D_2 \cos(2\varphi - \omega t) \right], \quad (6)$$

где $V_{\delta 0}$ – амплитуда рабочей гармоники индукции в ВЗ при отсутствии зубчатости и концентричном роторе;

D_{p+1}, D_{p-1} – коэффициенты демпфирования гармоник поля статора порядка $p+1$ и $p-1$ клеткой ротора /1, 5/.

Если учитывать в формуле (4) все слагаемые, то получаем, что в ВЗ присутствуют гармоники порядка $v = p \pm c$, где $c = 1, 2, 3, \dots$. В обмотке статора эти гармоники наводят ЭДС частоты питающей сети. В обмотке ротора эти гармоники поля наводят ЭДС, которая создает токи ротора и соответственно гармоники МДС ротора. Создаваемые ими гармоники поля в ВЗ имеют порядок $v' = v \pm c' Z_2 = p \pm c \pm c' Z_2$ (здесь $c' = 0, 1, 2, 3, \dots$) и возникают только при эксцентриситете ротора.

Метод ЭСК

В данном методе относительный эксцентриситет определяется по величине ЭДС, наведенной гармониками поля порядка $p \pm 1$. Для измерения гармоник поля порядка $p-1$ или $p+1$ необходимо разместить на статоре две измерительные катушки (ИК) с шагом, равным полному делению соответствующей гармоники и таким сдвигом между катушками, чтобы ЭДС от рабочей гармоники поля и гармоники, подлежащей измерению (порядка соответственно $p+1$ или $p-1$) была равна нулю /1, 2/.

Экспериментальное исследование ЭДС ИК E_k было проведено на двигателях специальной конструкции с регулируемым эксцентриситетом ротора и увеличенным ВЗ на базе

АИР100S2 (двигатель №1) и АИР100S4 (двигатель №2). В этих двигателях подшипниковые щиты имеют эксцентричные отверстия, в которые устанавливаются стаканы также с эксцентричным внутренним отверстием. В стаканы устанавливаются подшипники. За счет эксцентричной посадочной поверхности стаканов при их повороте происходит смещение оси ротора в отверстия статора (создается эксцентриситет ротора). Для уменьшения относительной погрешности установки эксцентриситета двигателя имеют увеличенный ВЗ по сравнению с серийными образцами.

Относительное изменение ЭДС E_k при изменении эксцентриситета ϵ от 0 до 1 составляет 7,76 для двигателя №2 и 4,22 для двигателя №1 (рисунок 1), что позволяет говорить о достаточной чувствительности и надежности метода. Отличные от нуля значения E_k при $\epsilon = 0$ обусловлены наличием в ВЗ гармоник зубцового порядка и некоторой геометрической погрешностью концентричной установки ротора.

Метод ПНТ

Основным недостатком рассмотренного выше метода является необходимость разборки двигателя для установки ИК на поверхности статора. Поэтому перспективным является метод определения относительного эксцентриситета ротора без разборки АД посредством измерения потенциала нейтральной точки звезды обмотки статора /1, 3/. В данном методе измеряется ЭДС E_{001} между нейтральной точкой звезды обмотки статора и нейтральной точкой звезды резисторов, подключенной к питающим зажимам двигателя (звезда резисторов создает «эталонный» нулевой потенциал). Схема измерения показана на рисунке 2.

Потенциал нейтральной точки обмотки статора складывается из гармоник ЭДС обмотки статора кратных трем, индуцированных со-

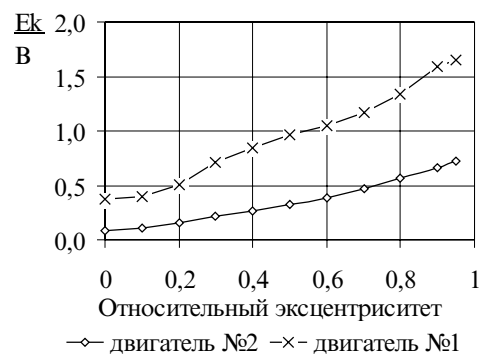


Рисунок 1. Экспериментальные значения ЭДС ИК при питающем напряжении 380 В

ответствующими гармониками поля в ВЗ. С точки зрения диагностики относительного эксцентриситета эти гармоники можно разделить на две группы:

а) «полезные» – гармоники поля, амплитуда которых увеличивается при увеличении эксцентриситета.

б) «мешающие» – гармоники поля, амплитуда которых при увеличении эксцентриситета остается постоянной или уменьшается.

«Полезные» гармоники несут информацию о величине относительного эксцентриситета, а «мешающие» создают шум и снижают чувствительность метода. Для увеличения чувствительности необходимо выделять из ЭДС E_{001} отдельные гармоники или группы гармоник в определенной полосе частот. На рисунках 3 и 4 представлены графики зависимости от эксцентриситета амплитуды отдельных гармоник ЭДС E_{001} , возрастание которых с увеличением эксцентриситета наиболее выражено. На рисунке 3 показана также зависимость от эксцентриситета действующего значения группы гармоник ЭДС E_{001} двигателя №2 в полосе частот 1900 ± 200 Гц.

Заключение

Экспериментальные исследования показали, что рассмотренные методы электромагнитной диагностики относительного эксцентриситета ротора (ЭСК и ПНТ) асинхронных двигателей обладают достаточной для практического использования степенью чувствительности. Метод ЭСК обладает большей чувствительностью и не требует дополнительной обработки диагностического сигнала по сравнению с методом ПНТ, но для его реализации требуется установка внутри двигателя измерительных катушек, что практически возможно только при изготовлении или ремонте двигателя.

Метод ПНТ может быть применен также на работающем двигателе, но для повышения чувствительности требует выделения высших гармоник определенных частот из измеряемой ЭДС. Кроме того, для реализации данного метода на двигателе должна быть выведена в коробку вы-

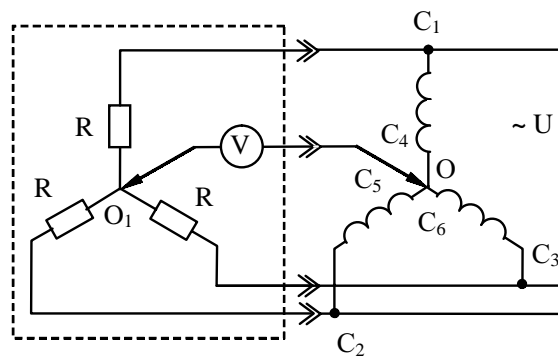


Рисунок 2. Схема измерения потенциала нейтральной точки ОС

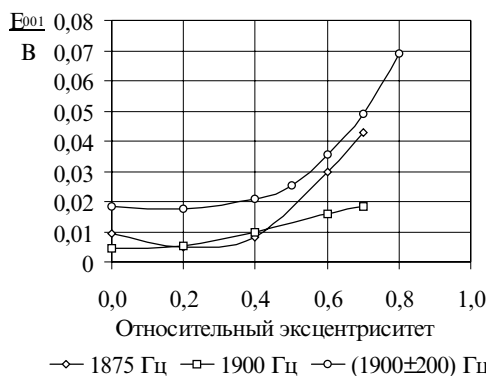


Рисунок 3. Зависимость отдельных гармоник ЭДС двигателя №2 от эксцентриситета при фазном напряжении питания 80 В

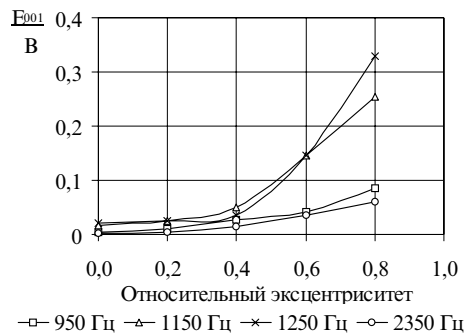


Рисунок 4. Зависимость отдельных гармоник ЭДС двигателя №1 от эксцентриситета при фазном напряжении питания 80 В

водов нейтральная точка обмотки статора.

Из сравнения рассмотренных методов диагностики можно сделать вывод, что метод ПНТ является более перспективным, так как, возникающие при его реализации некоторые трудности являются преодолимыми.

Список использованной литературы:

1. Никиян Н.Г. Многофазная реальная асинхронная машина: математическое моделирование, методы и средства диагностики: Монография. – Оренбург: ГОУ ВПО Оренбургский государственный университет, 2003. – 334 с.
2. Frohne H. Theorie ein Messeinrichtung zur Überwachung von Luftspaltdänderungen in Asynchronmaschinen mit Kdfiglaufnern, ETZ – A, Bd. 87 (1966), H.4.
3. А. С. 1176274 (СССР). Способ измерения относительного эксцентриситета электрической машины / Никиян Н.Г., Йондем М.Е. –Опубл. в Б.И., 1985, №32.
4. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.-Л.: Энергия.–1974. –840 с.
5. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия. –1981. –352 с.
6. Йондем М.Е., Никиян Н.Г., Акоюн Г.С. Магнитная проводимость воздушного зазора асинхронной машины при эксцентриситете ротора // Изв. ВУЗ-ов. Электромеханика. –1985. -№5. – С.32-35.