

## К РАСЧЕТУ МАГНИТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ НАЛИЧИИ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ВИТКОВ В ОБМОТКЕ СТАТОРА

**Сурков Д.В., канд. техн. наук., Падеев А.С., канд. техн. наук., доцент  
Оренбургский государственный университет**

Возникновение короткозамкнутых витков в обмотке статора – наряду с отказами подшипников одна из самых распространенных неисправностей асинхронных машин. Данный вид отказов составляет до 85 % [4].

Появление короткозамкнутых витков в обмотке статора приводит к следующим процессам:

- в поврежденной фазе остается меньше «рабочих» витков, следовательно, повышается магнитный поток через обмотку фазы, магнитное поле становится некруговым,
- повышенный поток фазы может привести к насыщению магнитной цепи и изменению гармонического состава фазных токов двигателя,
- в контуре короткозамкнутых витков появляется ток, магнитный поток которого сдвинут по фазе относительно основного потока фазы,
- ток короткозамкнутых витков приводит к повышенному нагреву близлежащих элементов машины.

Одним из способов расчета магнитного поля машины является метод удельной магнитной проводимости воздушного зазора [5].

При расчете магнитного поля в воздушном зазоре (ВЗ) электрических машин методом гармонических составляющих удельной магнитной проводимости необходимо получить выражения для магнитной проводимости ВЗ с учетом различных видов несимметрии обмотки статора и магнитной цепи.

Гармоники магнитного поля, возникающие при несимметрии обмотки статора, наводят ЭДС в обмотке статора или измерительных обмотках. По величине этой ЭДС возможно проводить диагностику несимметрии обмотки статора.

Проводимость воздушного зазора (ПВЗ) с учетом зубчатости статора и ротора определяется по формуле:

$$\sum \tilde{\lambda}_{\delta} = \Lambda_{e0} \times \left[ 1 + \sum_{k_{z1}=1}^{\infty} \sum_{n_{z1}=-\infty}^{\infty} \Lambda_{z1 k_{z1} n_{z1}} \cos(k_{z1} Z_1 + n_{z1})(\varphi - \varphi_{\varepsilon}) \right] \times \left[ 1 + \sum_{k_{z2}=1}^{\infty} \sum_{n_{z2}=-\infty}^{\infty} \Lambda_{z2 k_{z2} n_{z2}} \cos \left( (k_{z2} Z_2 + n_{z2})(\varphi - \varphi_{\varepsilon}) + \frac{k_{z2} Z_2 (1-s)\omega t}{p} \right) \right], \quad (1)$$

где  $\Lambda_{e0} = \frac{\mu_0}{\delta k_{\delta}}$  - постоянная составляющая ПВЗ;

$\Lambda_{z1k_{z1}n_{z1}}$ ,  $\Lambda_{z2k_{z2}n_{z2}}$  - амплитуды гармоник ПВЗ, вызванных зубчатостью магнитопроводов и определяемых по выражениям, приведенным в [1];

$s$  - скольжение ротора;

$Z_1$ ,  $Z_2$  - число пазов статора и ротора;

$\omega$  - угловая частота питающего напряжения.

В данной формуле каждое слагаемое  $\tilde{\lambda}_\delta$  представляет собой гармоническую составляющую результирующей ПВЗ.

В общем случае магнитное поле в ВЗ представляет собой сумму рабочей (основной) гармоники поля с числом пар полюсов  $\nu = p$ , 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 короткозамкнутых витков в обмотке статора.

По методу удельной магнитной ПВЗ 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, равная сумме МДС обмотки статора (с учетом неисправностей) и обмотки ротора (поле реакции ротора);

$\Lambda_\delta(\varphi, t)$  - удельная магнитная ПВЗ, с учетом влияния зубчатого строения магнитопроводов;

$\varphi$  - угловая координата по окружности статора.

По [3] МДС статора описывается выражением:

$$\sum \tilde{F}_{\delta s} = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} w_1 I_1 \sum_{\nu=(1+6c)p} \frac{k_{об\nu}}{\nu k_{\mu\nu}} \cos(\omega t - \nu\varphi), \quad (3)$$

где  $\nu$  - число пар полюсов (абсолютный порядок) гармоники МДС статора ( $c = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots = -\infty \dots + \infty$ ).

Гармоника поля статора с числом пар полюсов  $\nu$  создает в обмотке ротора систему токов и спектр гармоник МДС ротора, описываемый выражением [3]:

$$\sum \tilde{F}_{\delta r} = \frac{Z_2}{\sqrt{2}\pi} I_{rv} \sum_{\substack{\nu_r = \nu + Z_2 c \\ \nu_r \neq 0}} \frac{1}{\nu_r k_{\mu\nu r}} \cos(\omega_{rv} t - \nu_r \varphi - \nu_r \varphi_{vr}), \quad (4)$$

амплитуда гармоники:

$$F_{\delta r \nu m} = \frac{Z_2}{\sqrt{2\pi\nu_r k_{\mu\nu_r}}} I_{r\nu}, \quad (5)$$

где  $I_{r\nu}$  – действующее значение тока в стержне обмотки ротора, вызванного (наведенного)  $\nu$ -ой гармоникой поля в ВЗ;

$\omega_{r\nu}$  – круговая частота  $\nu$ -ой гармоники МДС ротора относительно статора;

$\varphi_{r\nu}$  – фаза МДС обмотки ротора.

При  $c'=0$  в (4) получаем гармонику МДС ротора, порядок которой определяется порядком вызвавшей ток  $I_{r\nu}$  гармоники магнитного поля с числом пар полюсов  $\nu_r = \nu$ . Эта гармоника МДС является реакцией ротора на гармонику поля в ВЗ  $B_{\delta\nu}$ . При  $c'=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  получаются «зубцовые» гармоники МДС обмотки ротора, вызванные током  $I_{r\nu}$  и связанные с дискретным расположением обмотки.

Для моделирования короткозамкнутых витков обмотки статора необходимо в выражении (4) исключить МДС короткозамкнутых витков  $\sum \tilde{F}_{\delta k3}$ , обусловленную током фазы обмотки, и добавить МДС короткозамкнутых витков, обусловленную током, наведенным в них магнитным полем машины.

Рассмотренный метод расчета магнитного поля машины позволяет рассчитать гармонические составляющие магнитного поля в ВЗ машины при наличии несимметрии обмотки статора. Появление дополнительных гармонических составляющих или значительное изменение их параметров относительно исправной машины, дает возможность проведения диагностики короткозамкнутых витков в обмотке статора.

#### Список литературы

1. Никиян, Н.Г. Уточнение методики расчета тарировочных зависимостей для диагностики эксцентриситета ротора асинхронных двигателей / Н.Г. Никиян, Д.В. Сурков // *Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Энергосбережение, электрооборудование, электроника»*. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, - 2005. – 120 с. с.57-60.

2. Сурков, Д.В. Методика расчета магнитного поля в воздушном зазоре асинхронного двигателя при статическом эксцентриситете ротора / Д.В. Сурков, Н.Г. Никиян // *Труды всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы»* – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2007. – 554с. С.191.

3. *Электрические машины [Текст]. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений / А.И. Вольдек. - 3-е изд., перераб. - Л.: Энергия, 1978. - 832 с., ил.*

4. Гольдберг, О. Д. Надежность электрических машин [Текст] : учеб. для вузов / О. Д. Гольдберг, С. П. Хелемская. - М. : Академия, 2010. - 288 с. - (Высшее профессиональное образование. Электротехника). - Прил.: с. 275-284. - Библиогр.: с. 285. - ISBN 978-5-7695-5739-2.

5. Никян, Н. Г. Освоение и оценка методов электромагнитной диагностики эксцентриситета ротора асинхронных двигателей [Текст] / Н. Г. Никян, Д. В. Сурков // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2005. - № 2. - С. 163-166. - Библиогр.: 6 назв.