

[4]:

$$M_{\vartheta} = \frac{1}{2} l_{\delta} \int_{l_r} ((H \times (B \times n) + B(H \times n)) \times r) dr,$$

где  $l_r$  – окружность с центром, совпадающим с центром вала ротора, и диаметром, равным внешнему диаметру ротора плюс длина воздушного зазора.

Заменив операции интегрирования суммированием, получим:

$$M_{\vartheta} = \frac{1}{2} l_{\delta} \sum_{l_r} ((H \times (B \times n) + B(H \times n)) \times r).$$

Таким образом, разработанная математическая модель расчета магнитного поля методом конечных элементов позволяет определять величины потокосцеплений обмоток статора и возбуждения, величину электромагнитного момента вентильного высокомоментного двигателя комбинированного возбуждения с учетом реальной геометрии магнитной системы, насыщением ее отдельных участков в стационарном режиме.

1. Сильвестр П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров инженеров-электриков: Пер с англ. – М.: Мир, 1986. – 232 с.

2. Зюзин Д.Ю., Любарский Б.Г., Глебова М.Л. Конструктивная схема вентильного высокомоментного двигателя комбинированного возбуждения // Вестник НТУ «ХПИ». Вып.19. – Харьков, 2002. – С.85–88.

3. Faund F.A., Nehl T.W., Demerdash N.A. Permanent magnet modeling for use in vector potential finite element analysis in electrical machinery // Transactions of IEEE on magnetic, vol. MAG-17. – 1981. – №6. – P.3002-3004.

4. <http://femm.berlios.de>

*Получено 16.11.2004*

УДК 621.313

М.Л.ГЛЕБОВА, Г.В.КАПУСТИН, кандидаты техн. наук,

В.Б.ФИНКЕЛЬШТЕЙН, д-р техн. наук

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

### **СПОСОБ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА В ОБМОТКЕ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА**

Предлагается способ непосредственного измерения тока в обмотке короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя в режиме короткого замыкания.

В классической теории асинхронных машин [1] в режиме короткого замыкания используют допущение о том, что ток в обмотке ста-

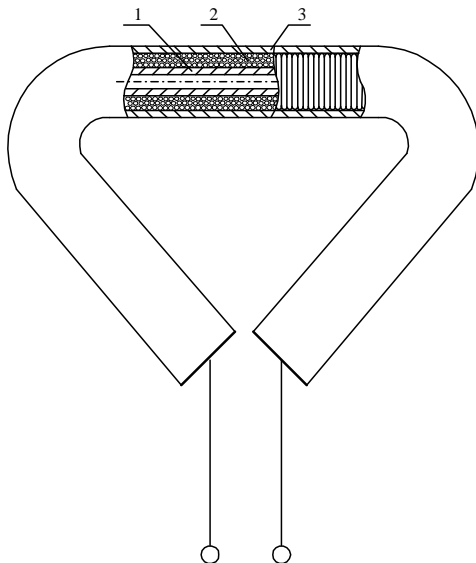
тора  $I_{1(k)}$  равен приведенному значению тока в обмотке ротора  $I'_{2(k)}$ . Это допущение было подвергнуто экспериментальной проверке путем непосредственного измерения тока в обмотке ротора. Ток в короткозамкнутой алюминиевой клетке ротора  $I_{Al}$  был измерен воздушным трансформатором в пусковом режиме, для чего было изготовлено специальное тормозное устройство, позволяющее зафиксировать ротор в неподвижном состоянии. В этом случае не возникает трудностей с выводом измерительных клемм датчиков тока, расположенных в роторе, они были выведены через просверленные отверстия в переднем и заднем подшипниковых щитах. Асинхронный двигатель (АД) в режиме короткого замыкания включался кратковременно (порядка 2-3 с), за это время электрические переходные процессы затухали и производились измерения [2].

Все традиционно используемые амперметры для измерения токов включаются последовательно в электрическую цепь, в которой необходимо его измерить [3]. Для непосредственного измерения тока в короткозамкнутой клетке ротора традиционный способ неприемлем. Поэтому при проведении экспериментальных исследований использовался способ определения тока при помощи гибких воздушных трансформаторов (поясов Роговского) [4]. Принцип действия таких датчиков основан на законе полного тока и заключается в следующем. Для измерения тока в какой-либо ограниченной области необходимо ее охватить воздушным трансформатором в плоскости перпендикулярной направлению протекания тока. В измерительной обмотке датчика будет наводиться ЭДС, которую можно измерить милливольтметром, а затем, зная тарировочный коэффициент датчика, вычислить величину тока.

Короткозамкнутый ротор исследуемого АД был препарирован таким образом, чтобы возможно было охватить те области и элементы конструкции ротора, в которых необходимо измерить токи. Для измерения тока в короткозамыкающем кольце было просверлено радиальное отверстие диаметром 6 мм с центром, отстоящим от края магнитопровода на расстоянии 3 мм.

Для непосредственного измерения тока в различных элементах конструкции ротора были изготовлены гибкие магнитные потенциометры [3, 4] (воздушные токовые трансформаторы, пояса Роговского) диаметром 4 мм различной длины (рисунок). Измерительная обмотка датчика 2 была намотана обмоточным проводом ПЭТВ диаметром 0,071 мм на гибкую лавсановую трубку 1 и защищена от механических повреждений полихлорвиниловой трубкой 3. Обмотка датчика

намотана в три слоя для уменьшения тарировочного коэффициента, что приводит к увеличению точности измерения, и для более удобного вывода концов измерительной обмотки по обе стороны датчика. Однако в этом случае при измерениях необходимо рядом с датчиком укладывать компенсационный виток, включенный встречно измерительной обмотке датчика, так как число слоев измерительной обмотки воздушного трансформатора должно быть четным, чтобы скомпенсировать ЭДС, наводимую в контуре, по которому расположен датчик.



Воздушный токовый трансформатор (пояс Роговского):  
1 – гибкая лавсановая трубка; 2 – измерительная обмотка (три слоя);  
3 – полихлорвиниловая трубка.

Перед измерениями токов воздушные трансформаторы тарировались следующим образом. В эталонной катушке без сердечника с числом витков  $W_K=400$  устанавливали ток  $I^{(k)}=1\div 3$  А ( $k=1,2,3$ ). Поясом Роговского с компенсационным витком охватывали витки катушки с током.

Милливольтметром были измерены ЭДС  $E_{ЭТ}^{(k)}$ , наводимые в измерительной обмотке датчика, при различных значениях тока в эталонной катушке. Усредненное значение тарировочного коэффициента рассчитано по формуле

$$\tilde{K}_{TAP} = \frac{\frac{I^{(1)} \cdot W_k}{E_{ЭТ}^{(1)}} + \frac{I^{(2)} \cdot W_k}{E_{ЭТ}^{(2)}} + \frac{I^{(3)} \cdot W_k}{E_{ЭТ}^{(3)}}}{3}, A/B. \quad (1)$$

Значение тарировочного коэффициента  $\tilde{K}_{TAP}$  для всех датчиков различной длины получилось одинаковым, так как  $\tilde{K}_{TAP}$  определяется диаметром витка измерительной обмотки и количеством ее слоев, и не зависит от длины самого магнитного потенциаломера.

Для проверки точности измерения токов воздушными трансформаторами была проведена экспериментальная поверка. Поясом Роговского была охвачена лобовая часть обмотки статора экспериментального образца асинхронного двигателя, который был включен в сеть через комбинированный комплект К-540. В режимах короткого замыкания и холостого хода были измерены токи статора непосредственно комплектом и рассчитаны по ЭДС, наведенной в измерительной обмотке воздушного трансформатора. Погрешность измерения с использованием магнитного потенциаломера составила менее 0,05%, что свидетельствует о достаточно хорошей достоверности результатов измерения токов с использованием воздушных трансформаторов.

Ток в обмотке ротора  $I_{AI}$  был измерен в короткозамыкающих кольцах  $I_{AI(K)}$ : в левом –  $I_{AI(Kл)}$  и правом –  $I_{AI(Kп)}$ . Для измерения тока в короткозамыкающем кольце на препарированном роторе оно было охвачено воздушным трансформатором.

Измерительная обмотка воздушного трансформатора и компенсационный виток соединены электрически встречно, т.е. их выводы по одну сторону кольца соединены между собой, а полезный сигнал ЭДС с пояса Роговского  $E_{(ПП)}$  снимается с выводов по другую сторону.

Абсолютное значение тока в кольце по сигналу  $E_{(ПП)}$  было определено по формуле

$$I_{AI(K)} = E_{(ПП)} \cdot \tilde{K}_{TAP}(A), \quad (2)$$

где  $\tilde{K}_{TAP}$  – тарировочный коэффициент воздушного трансформатора.

Приведенное значение тока в обмотке ротора  $I'_2$  по току в кольце  $I_{AI(K)}$  можно определить по формуле

$$I'_2 = I_{Al(K)} \cdot K_I \cdot 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{Z_2}\right) (A), \quad (3)$$

где  $K_I = \frac{m_2 \cdot W_2}{m_1 \cdot W_{1\phi}}$  – коэффициент приведения по току;  $m_1$  – число фаз обмотки статора;  $m_2$  – число фаз обмотки ротора;  $W_{1\phi}$  – число эффективных витков фазы обмотки статора;  $W_2 = 1/2$  – число витков фазы обмотки ротора.

Экспериментальные исследования по непосредственному измерению тока в обмотке короткозамкнутого ротора при различном напряжении питающей сети проводились на препарированном асинхронном короткозамкнутом двигателе, для которого имеет место наибольшее отклонение расчетных данных от экспериментальных по кратностям пускового, минимального и максимального моментов, кратности пускового тока и коэффициенту мощности в режиме короткого замыкания.

По формуле (3) были определены приведенные значения тока в стержне ротора возле левого  $I'_{2(L)}$  и правого кольца  $I'_{2(Пp)}$  по измерениям токов в кольцах  $I_{Al(Kл)}$  и  $I_{Al(Knp)}$ , соответственно. Для измерения тока в другом (правом) короткозамыкающем кольце  $I_{Al(Knp)}$  использовался тот же датчик тока с компенсационным витком, но было изменено чередование фаз питающей сети асинхронного двигателя. Фазный ток в обмотке статора  $I_{1(K)}$  измерялся с помощью комплекта К-540. Все экспериментальные данные были соответствующим образом обработаны.

Таким образом, погрешность допущения о равенстве тока в обмотке статора приведенному току ротора  $I_{1(K)} = I'_{2(K)}$  в режиме короткого замыкания для исследуемого асинхронного двигателя составила (9,6-18,8)%. Очевидно, что такая погрешность допущения вносит ощутимую погрешность в расчет пусковых характеристик асинхронных двигателей. Необходимо в разрабатываемых математических моделях асинхронных машин отказаться от указанного допущения и точно рассчитывать ток в обмотке ротора.

1.Петров Г.Н. Электрические машины. Ч.II. – М.: Энергия, 1963. – 416 с.

2.Чабан В.И. Основы теории переходных процессов электромагнитных систем. – Львов: Вища школа, 1980. – 199 с.

3.Зыкин Ф.А. Устройство для измерения магнитных потоков, намагничивающих сил и токов // Электричество. – 1995. – №1. – С.75-79.

4.Кифер И.И. Испытание ферромагнитных материалов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 544 с.

Получено 23.11.2004

УДК 621.3

А.А.ХАРИСОВ, канд. техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

### К РАСЧЕТУ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРЯМЫХ УСЕЧЕННЫХ КОНУСООБРАЗНЫХ ТОКОВЕДУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Методами электродинамики сплошных сред и учетом нормального («колоколообразного») распределения плотности постоянного тока в уединенных прямых цилиндрических проводниках выведена формула расчета омического сопротивления прямых усеченных конусообразных токоведущих элементов.

Как показывает анализ, в электротехнической и физико-технической литературе фактически отсутствуют достаточно обоснованные физические расчетные модели омического сопротивления усеченных конусообразных токоведущих элементов. Связано это, в основном, с известными трудностями точного определения формы распределения плотности тока в поперечном сечении токоведущих прямых круговых проводников. Учитывая это, представляет как теоретический, так и практический интерес разработка расчетной модели омического сопротивления усеченных конусообразных элементов с учетом нормального («колоколообразного») распределения плотности постоянного тока в поперечном сечении уединенных прямых круговых цилиндрических проводников [1]:

$$J_0(x, y) = \frac{I}{\pi \left( \frac{\sqrt{\pi} r_0}{2\sqrt{2}} \right)^2} \exp \left[ - \frac{x^2 + y^2}{\left( \frac{\sqrt{\pi} r_0}{2\sqrt{2}} \right)^2} \right]$$

или

$$J_0(\vec{r}) = \frac{I}{\pi \left( \frac{\sqrt{\pi} r_0}{2\sqrt{2}} \right)^2} \exp \left[ - \frac{r^2}{\left( \frac{\sqrt{\pi} r_0}{2\sqrt{2}} \right)^2} \right],$$

(1)