

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С НЕРАВНОМЕРНЫМ ЗАЗОРОМ

В. А. САГАЙДАК

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Общие замечания. Анализируя работу асинхронных микродвигателей методом вращающихся полей, удается сравнительно просто учесть пространственные высшие гармоники магнитного поля в воздушном зазоре и потери в стальном сердечнике. Методом вращающихся полей можно получить уравнения, позволяющие с достаточной точностью произвести расчет пусковых и рабочих характеристик, в том числе и двигателей весьма малой мощности порядка нескольких ватт и ниже, имеющих сосредоточенные несимметричные обмотки статора, сдвинутые в пространстве на произвольный угол [1, 2]. Особенно точные уравнения удастся получить применительно к двигателям с полым ротором, имеющим распределенные параметры обмотки ротора и насыщенную магнитную систему.

Некоторые трудности возникают при анализе работы указанным методом двигателей с неравномерным воздушным зазором, например, двигателей с расщепленными полюсами. Затруднения в использовании метода вращающихся полей в этом случае обуславливаются тем, что та или иная система токов постоянной амплитуды, образующая вращающуюся волну намагничивающих сил, создает в различные моменты времени магнитные потоки разной величины. Отмеченное явление возникает из-за того, что магнитное сопротивление на пути основного потока машины с неравномерным зазором различно для разных напряжений действия намагничивающих сил.

Ниже излагается один из возможных путей преодоления отмеченной трудности использования метода вращающихся полей.

### Схема вывода основных уравнений в машинах с размерным зазором

Вывод основных уравнений методом вращающихся полей для машины с равномерным зазором производится обычно в следующей последовательности:

1. Вводятся обозначения неизвестных пока токов всех обмоток машины. При этом предполагается, что в роторе в общем случае имеются две основные системы токов (прямая и обратная), а также ряд систем токов высших порядков.

2. Определяются намагничивающие силы, создаваемые обмотками статора и системами токов короткозамкнутой обмотки ротора.

3. Пульсирующие намагничивающие силы обмоток статора разлагаются в ряд пульсирующих пространственных гармоник намагничивающих сил в воздушном зазоре.

4. Каждая пульсирующая гармоника разлагается на две вращающихся в противоположные стороны.

5. Подсчитываются суммарные (от всех обмоток машины) «прямые» и «обратные» волны намагничивающих сил, а затем — и соответствующие круговые магнитные поля.

6. Составляются уравнения баланса напряжений для каждой обмотки статора и для каждой системы токов ротора в отдельности.

Полученная система уравнений и является исходной для дальнейшего анализа работы машины или расчета ее характеристик.

### **Отличительные особенности возможной схемы вывода основных уравнений в машинах с неравномерным зазором**

Для того, чтобы преодолеть вышеизложенное затруднение, приходится суммировать не намагничивающие силы, а одноименные вращающиеся магнитные поля, создаваемые отдельными обмотками статора или отдельными системами токов ротора.

**Расчет магнитных полей, создаваемых одной из обмоток статора,** можно производить по следующей схеме:

1. Определить форму пульсирующей намагничивающей силы обмотки.

2. Определить форму пульсирующего магнитного поля в воздушном зазоре с учетом характера изменения воздушного зазора вдоль окружности якоря.

3. Разложить пульсирующее магнитное поле сложной формы в ряд пульсирующих пространственных гармоник.

4. Представить каждое элементарное пульсирующее поле в виде двух круговых полей, вращающихся в противоположные стороны. Полезно подчеркнуть, что в последнем случае так же, как и при разложении пульсирующего поля сложной формы в ряд пульсирующих пространственных гармоник, нас уже не беспокоит ни величина, ни форма воздушного зазора. В обоих случаях производится попросту эквивалентная замена одних магнитных полей другими.

Вышеописанная процедура на первый взгляд кажется довольно громоздкой, однако, в наиболее часто встречающихся случаях выкладки значительно упрощаются. Рассмотрим, например, двигатель с расщепленными полюсами, имеющий сосредоточенные обмотки на статоре и постоянный по величине воздушный зазор ( $\delta_1$ ) под выступающими полюсами. Намагничивающая сила, например, вспомогательной обмотки имеет прямоугольную форму. Форма магнитного поля повторяет форму намагничивающей силы и, следовательно, расчет амплитуды основной гармоники магнитного поля (аналогично — высших гармоник) можно вести в предположении, что воздушный зазор по всей окружности якоря одинаков и равен  $\delta_1$ . Действительно, вне зависимости от характера зазора за пределами шага вспомогательной обмотки ( $y_3$ ) форма и величина поля в пределах  $y_3$  остается неизменной. При расчете амплитуды гармонической составляющей необходимо, разумеется, учесть коэффициент сокращения шага соответствующей гармоники, имея в виду, что шаг обмотки меньше полюсного деления (см. приложение).

**Расчет магнитных полей, создаваемых некоторой системой токов ротора,** производится аналогичным образом:

1. Предварительно вращающаяся волна намагничивающей силы, например, основной системы токов ротора прямой последовательности ( $F_{2f}$ ) заменяется двумя эквивалентными намагничивающими силами  $F_{2d}$  и  $F_{2q}$ , пульсирующими соответственно вдоль и поперек оси магнитной системы.

2. Далее производится расчет магнитных полей, создаваемых неподвижными пульсирующими намагничивающими силами, описанным выше путем.

В последнем случае необходимо принять во внимание, что синусоидальная в пространстве намагничивающая сила (например  $F_2$  или  $F_{2q}$  в машине с неравномерным зазором) образует несинусоидальное поле. Расчет основной гармоники пульсирующих полей (в нашем примере  $\Phi_{2d}$  и  $\Phi_{2q}$ ) можно провести путем, аналогичным известному в теории явнополюсных синхронных машин. Для этой цели, как известно, достаточно при расчете пульсирующих намагничивающих сил ввести соответствующий поправочный коэффициент  $k_d$  и  $k_q$ , а основную гармонику поля подсчитать далее, полагая воздушный зазор постоянным и равным  $\delta_1$  по всей окружности якоря.

Вышеизложенная методика иллюстрируется ниже примером вывода основных уравнений двигателя с расщепленными полюсами. Для простоты изложения пространственные высшие гармоники магнитного поля в зазоре ниже не учитываются. Более подробно анализ работы асинхронных двигателей с расщепленными полюсами с учетом, в том числе и пространственных высших гармоник, приводится в [2].

### Заключение

Отметим в заключение некоторые выводы, вытекающие из вышеизложенного, а также из примера, рассмотренного в приложении.

1. Метод вращающихся полей можно применять без анализа работы и расчета несимметричных асинхронных двигателей с неравномерным воздушным зазором.

2. Метод вращающихся полей позволяет просто учесть магнитные потери и пространственные высшие гармоники поля в воздушном зазоре.

3. Математические выкладки при анализе работы методом вращающихся полей естественным образом сопровождаются наглядными физическими представлениями.

4. Метод вращающихся полей позволяет свести количество коэффициентов основной системы уравнений, обусловленных полями взаимной индукции, до минимума. Так, например, при анализе работы двигателя с расщепленными полюсами оказывается возможным обойтись всего двумя такого рода коэффициентами:  $x_{\mu}$  — обусловленным полем «общей» взаимной индукции, сцеплением со всеми обмотками (статора и ротора);  $x_m$  — обусловленным полем «частичной» взаимной индукции, сцепленным только с обмотками статора.

При анализе работы тех же двигателей методом поперечного поля приходится вводить шесть и более аналогичных коэффициентов.

5. Расчет реактивности  $x_{\mu}$  производится в предположении, что воздушный зазор равен  $\delta_1$  по всей окружности якоря, т. е. способом, хорошо известным из теории симметричных асинхронных двигателей.

6. Отличительные особенности двигателя с неравномерным зазором учитываются введением в расчет обмоточных коэффициентов и коэффициентов  $\kappa_d$  и  $\kappa_q$ , расчет которых не представляет затруднений.

### Приложение

Пример вывода основной системы уравнений рабочего процесса двигателя с расщепленными полюсами методом вращающихся полей (без учета пространственных высших гармоник поля в воздушном зазоре).

1. Поток главной обмотки

$$\Phi_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot I_1 \cdot w_1'}{2p} \cdot \frac{4}{\pi} \gamma_\mu = 2\kappa_1 w_1' \kappa I_1. \quad (1)$$

Здесь

$$2\kappa_1 = \frac{\sqrt{2}}{2p} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \gamma_\mu, \quad (2)$$

$\gamma_\mu$  — магнитная проводимость магнитопровода при равномерном зазоре;  $\kappa$  — комплексный коэффициент, учитывающий потери в стали  $w_1' = w \cdot \kappa_w$ . (3)

2. Прямая и обратная круговые составляющие поля главной обмотки

$$\bar{\Phi}_{1f} = \kappa_1 \cdot w_1' \cdot \kappa \cdot I_1, \quad (4)$$

$$\bar{\Phi}_{1b} = \kappa_1 \cdot w_1' \cdot \kappa \cdot I_1.$$

3. Аналогичные потоки вспомогательной обмотки, ориентированные относительно оси главной обмотки,

$$\bar{\Phi}_{3f} = \kappa_1 \cdot w_3' \cdot \kappa \cdot I_3 \cdot e^{j\beta}, \quad (5)$$

$$\bar{\Phi}_{3b} = \kappa_1 \cdot w_3' \cdot \kappa \cdot I_3 \cdot e^{-j\beta}.$$

4. Намагничивающие силы прямой и обратной систем токов ротора

$$\bar{F}_{2f} = \frac{\kappa_1}{\gamma_\mu} \cdot w_2' \cdot m_2 \cdot I_f, \quad (6)$$

$$\bar{F}_{2b} = \frac{\kappa_1}{\gamma_\mu} \cdot w_2' \cdot m_2 \cdot I_b.$$

5. Пульсирующие вдоль и поперек оси магнитной системы суммарные составляющие обеих намагничивающих сил

$$\bar{F}_{2d} = \frac{\kappa_1}{\gamma_\mu} \cdot w_2' \cdot m_2 \cdot (I_f + I_b), \quad (7)$$

$$\bar{F}_{2g} = \frac{\kappa_1}{\gamma_\mu} \cdot w_2' \cdot m_2 (j I_f - j I_b).$$

6. Пульсирующие продольное и поперечное поля от токов ротора. С учетом неравномерности зазора ( $\kappa_d$ ,  $\kappa_g$ )

$$\bar{\Phi}_{2d} = \kappa_d \cdot \kappa_1 \cdot w_2' \cdot m_2 \cdot \kappa \cdot (I_f + I_b), \quad (8)$$

$$\bar{\Phi}_{2g} = j \cdot \kappa_d \cdot \kappa_1 \cdot w_2' \cdot m_2 \cdot \kappa (I_f - I_b).$$

7. Примем во внимание, что в пространстве оси полей  $\Phi_{2d}$  и  $\Phi_{2g}$  сдвинуты на  $\pi/2$  электрических радиан. Тогда суммарное прямое и обратное круговые поля от токов ротора

$$\bar{\Phi}_{2f} = \kappa_1 \cdot \omega'_2 \cdot m_2 \cdot \kappa \left( i_f \frac{\kappa_d + \kappa_g}{2} + i_b \frac{\kappa_d - \kappa_g}{2} \right), \quad (9)$$

$$\bar{\Phi}_{2b} = \kappa_1 \cdot \omega'_2 \cdot m_2 \cdot \kappa \cdot \left( i_f \frac{\kappa_d - \kappa_g}{2} + i_b \frac{\kappa_d + \kappa_g}{2} \right).$$

8. Результирующие прямое и обратное поля, созданные всеми тремя обмотками ротора

$$\bar{\Phi}_f = \kappa_1 \cdot \omega'_1 \cdot \kappa \left( i_1 + e^{j\beta} i_3 + \frac{\kappa_d + \kappa_g}{2} \cdot i'_f + \frac{\kappa_d - \kappa_g}{2} i'_b \right), \quad (10)$$

$$\bar{\Phi}_b = \kappa_1 \cdot \omega'_1 \cdot \kappa \cdot \left( i_1 + e^{-j\beta} i_3 + \frac{\kappa_d - \kappa_g}{2} \cdot i'_f + \frac{\kappa_d + \kappa_g}{2} \cdot i'_b \right).$$

9. Э. д. с., индуцируемые в обмотках машины с эквивалентным неподвижным ротором

$$\dot{E}_{2f} = -j \cdot \kappa_0 \cdot \omega'_2 \cdot \bar{\Phi}_f, \quad (11)$$

$$\dot{E}_{2b} = -j \kappa_0 \omega'_2 \cdot \bar{\Phi}_b,$$

$$\dot{E}_{1\mu} = -j \kappa_0 \cdot \omega'_1 \cdot (\bar{\Phi}_f + \bar{\Phi}_b),$$

$$\dot{E}_{3\mu} = -j \kappa_0 \cdot \omega'_3 (e^{-j\beta} \bar{\Phi}_f + e^{j\beta} \bar{\Phi}_b).$$

Или, вводя сопротивление контура намагничивания

$$z_\mu = j \kappa_0 \cdot \kappa_1 (\omega'_1)^2 \cdot \kappa = j x_\mu \cdot \kappa \quad (12)$$

и приводя обмотку ротора и вспомогательную к числу витков и обмоточному коэффициенту главной обмотки,

$$\dot{E}'_{2f} = -z_\mu \left( i_1 + e^{j\beta} i_3 + \frac{\kappa_d + \kappa_g}{2} i'_f + \frac{\kappa_d - \kappa_g}{2} i'_b \right), \quad (13)$$

$$\dot{E}'_{2b} = -z_\mu \left( i_1 + e^{-j\beta} i_3 + \frac{\kappa_d - \kappa_g}{2} \cdot i'_f + \frac{\kappa_d + \kappa_g}{2} i'_b \right),$$

$$\dot{E}'_{1\mu} = -2z_\mu \left( i_1 + \cos \beta i_3 + \frac{i'_f + i'_b}{2} \right),$$

$$\dot{E}'_{3\mu} = -2z_\mu \left( i_1 \cos \beta + i_3 + \frac{i'_f + i'_b}{2} \cos \beta - \right. \\ \left. - j \frac{i'_f - i'_b}{2} \cdot \sin \beta \right).$$

10. Учтя далее э.д.с. от поля частичной взаимоиндукции и потоков рассеяния, а также активные сопротивления обмоток, составим уравнение баланса напряжений цепи главной, вспомогательной обмоток и контуров прямого и обратного токов ротора

$$\dot{U}_1 = i_1 (z_1 + 2z_\mu + z_m) + i_3 (2z_\mu \cdot \cos \beta + \kappa_m z_m) + i'_f z_\mu + i'_b \cdot z_\mu;$$

$$\begin{aligned}
0 &= \dot{I}_1 (2z_\mu \cos \beta + \kappa_m z_m) + \dot{I}'_3 (z'_3 + 2z_\mu + \kappa_m^3 z_m) + \\
&\quad + \dot{I}'_f z_\mu e^{-j\beta} + \dot{I}'_b z_\mu e^{j\beta}; \\
0 &= \dot{I}_1 z_\mu + \dot{I}'_3 z_\mu e^{j\beta} + \dot{I}'_f \left( z'_f + z_\mu \frac{\kappa_d + \kappa_g}{2} \right) + \dot{I}'_b z_\mu \frac{\kappa_d - \kappa_g}{2}; \\
0 &= \dot{I}_1 z_\mu + \dot{I}'_3 z_\mu e^{-j\beta} + \dot{I}'_f z_\mu \frac{\kappa_d - \kappa_g}{2} + \dot{I}'_b \left( z'_b + z_\mu \frac{\kappa_d + \kappa_g}{2} \right).
\end{aligned}$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Сагайдак. Исследование маломощных однофазных асинхронных электродвигателей методом вращающихся полей. Труды НЭТИ, т. 1, 1953.
2. В. А. Сагайдак. Анализ работы однофазных асинхронных электродвигателей с расщепленными полюсами методом вращающихся полей. Труды НЭТИ, т. 3, 1961.