

## Практическое занятие 4

### РАСЧЕТ ПЕРЕМЕННЫХ РАДИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ В АД ПРИ НЕСИММЕТРИИ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ В СЭЭС

*Постановка задачи.* Радиальные силы, создаваемые основными магнитными полями, вызывают вибрацию на частоте  $2\omega_1$  с порядком  $r = 2p$ . Такие вибрации сильно проявляются в крупных АД с числом полюсов  $2p = 2$ . Силовые волны, возникающие при взаимодействии высших гармоник, вызывают наиболее интенсивные вибрацию и шум при низких порядках  $r = 0, 1, 2, 3, 4$ . Значение и распределение радиальных магнитных сил в воздушном зазоре определяется магнитной индукцией, расчет которой требует достаточно подробных характеристик обмоток статора и ротора. Некоторые характеристики достаточно стабильны и могут быть использованы для расчета. Радиальная электромагнитная сила, действующая на единицу площади (приведенная к среднему радиусу спинки статора), определяется формулой для амплитудных значений:

$$P = \frac{1}{2\mu_0} B^2,$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$  – магнитная постоянная;  $B$  – магнитная индукция в воздушном зазоре. Обычно принимают  $B = 0,8 \text{ Тл}$  для амплитуды силовых волн, возбуждаемых первыми пазовыми гармониками. Если знать число пазов на полюс и фазу  $q$  ( $q_0 = 3-5$ ), можно воспользоваться приближенным выражением  $P = 10/q_0^2$ . При этом амплитуда силовой волны составляет  $0,5 \dots 1 \text{ Н/см}^2$ . В данном расчете необходимо определить влияние качества электроэнергии на шум и вибрации, поэтому следует рассчитать амплитуды магнитного поля, возбуждаемого системой токов прямой и обратной последовательностей  $q$ -й гармоники тока.

*Исходные данные.* Амплитуда основной волны магнитной индукции прямой и обратной последовательностей при несимметрии напряжения  $B_{10}$ ,  $B_{20}$ , Тл; частота напряжения питания  $\omega_0$ , рад/с; число пар полюсов  $p$ ; амплитуда основной волны магнитной индукции, создаваемой  $q$ -й гармоникой тока  $B_q$ . В том случае, когда параметры магнитной индукции не заданы, необходимо иметь данные об обмотке статора и параметры схемы замеще-

ния. Кроме того, должны быть заданы: число эффективных проводников в фазе обмотки статора  $w$ ; обмоточный коэффициент  $K_{об}$ ; коэффициент Картера  $K_c$ ; величина воздушного зазора  $\delta$ , мм; амплитуды намагничивания тока из схемы замещения АД для напряжения прямой и обратной последовательностей  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  или данные для их расчета.

*Требуется найти.* Амплитуды силовых волн  $P_q$ ,  $P'_{qq}$ ; частоты силовых волн  $\omega_q$ ,  $\omega'_{qq}$ ; порядки силовых волн  $r_q$ ,  $r'_{qq}$ .

*Алгоритм расчета.* Радиальные электромагнитные силы при несимметрии напряжения без учета высших гармоник и зубцовых гармоник поля характеризуются угловой частотой силовых волн:  $\omega_2 = 2\omega_1$ ; порядком силовых волн  $r_1 = r_2 = 2p$ ,  $r_{12} = 0$  и амплитудой силовых волн:

$$P_{10} = \frac{1}{4\mu_0} B_{10}^2; P_{20} = \frac{1}{4\mu_0} B_{20}^2; P_{1020} = \frac{1}{4\mu_0} B_{10} B_{20},$$

где  $B_{10} = 1,35 \frac{wK_{об}\mu_0}{pK_c\delta} I_{01}$ ;  $B_{20} = 1,35 \frac{wK_{об}\mu_0}{pK_c\delta} I_{02}$ ;  $I_{01} = \dot{U}_1 \left(1 - \frac{Z_{st}}{Z_1}\right) Y_m$ ;

$$I_{02} = \dot{U}_2 \left(1 - \frac{Z_{st}}{Z_2}\right) Y_m; Z_{st} = R_{st} + jX_{st}; Z_1, Z_2 - \text{полные комплексные}$$

сопротивления схемы замещения АД для токов прямой и обратной последовательностей.

Схемы замещения АД для токов прямой и обратной последовательностей приведены на рис. 4.1. Радиальные электромагнитные силы при несинусоидальности напряжения питания характеризуются:

- амплитудой силовых волн  $P_q = \frac{1}{4\mu_0} B_q^2$ ;  $P'_{qq} = \frac{1}{4\mu_0} B_q B'_q$ ;
- угловой частотой силовых волн  $\omega_q = 2q\omega_1$ ;  $\omega'_{qq} = |q \pm q'|\omega_1 = 2|3k + 1|\omega_1$ ;
- порядком силовых волн  $r_q = 2p$ ;  $r'_{qq} = 0$ .

Напомним, что упрощенная схема замещения АД приведена на рис. 5.1.

*Пример расчета.* Исходные данные для несимметрии напряжения:  $I_{01} = 10$  А;  $I_{02} = 1$  А;  $w = 10$ ;  $p = 2$ ;  $\delta = 0,2$  мм;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн · м<sup>-1</sup>;  $K_{об} = 0,9$ ;  $K_c = 1,2$ .

Амплитуды основной волны магнитной индукции прямой и обратной последовательностей:

$$B_{10} = 1,35 \frac{10 \cdot 0,9}{2 \cdot 1,2 \cdot 0,0002} 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10 = 0,318 \text{ Тл};$$

$$B_{20} = 1,35 \frac{10 \cdot 0,9}{2 \cdot 1,2 \cdot 0,0002} 4\pi \cdot 10^{-7} = 0,032 \text{ Тл}.$$

Амплитуды силовых волн радиальных электромагнитных сил:

$$P_{10} = \frac{1}{4\mu_0} 0,318^2 = \frac{10^7}{4 \cdot 4\pi} 0,318^2 = 20128 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2};$$

$$P_{20} = \frac{1}{4\mu_0} 0,032^2 = 203 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Исходные данные для несинусоидальности напряжения:

$$I_1 = 5 \text{ А}; I_5 = 3 \text{ А}; I_7 = 2 \text{ А}; I_{11} = 1 \text{ А}; I_{13} = 0,5 \text{ А}.$$

Амплитуды основной волны магнитной индукции:

$$B_1 = 1,35 \frac{10 \cdot 0,9}{2 \cdot 1,2 \cdot 0,0002} 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 = 0,0318 \cdot 5 = 0,159 \text{ Тл}.$$

Аналогично рассчитываются амплитуды магнитной индукции:

$$B_5 = 0,0318 \cdot 3 = 0,096 \text{ Тл}; B_7 = 0,0318 \cdot 2 = 0,064 \text{ Тл};$$

$$B_{11} = 0,0318 \cdot 1 = 0,032 \text{ Тл}; B_{13} = 0,0318 \cdot 0,5 = 0,016 \text{ Тл}.$$

Амплитуды силовых волн:

$$P_1 = \frac{1}{4\mu_0} B_1^2 = \frac{10^7}{4 \cdot 4\pi} 0,159^2 = 5032 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}; P_5 = \frac{1}{4\mu_0} B_5^2 = 1834 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2};$$

$$P_7 = \frac{1}{4\mu_0} B_7^2 = 815 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}; P_{11} = \frac{1}{4\mu_0} B_{11}^2 = 203 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2};$$

$$P_{13} = \frac{1}{4\mu_0} B_{13}^2 = 50 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Значение угловой частоты:  $\omega_1 = 2\omega_0$ ;  $\omega_5 = 5\omega_0$ ;  $\omega_7 = 7\omega_0$ ;  $\omega_{11} = 11\omega_0$ ;  $\omega_{13} = 13\omega_0$ . Исходные данные для расчета приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Величина	Размерность	Вариант								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{01}$	А	10	10,5	11	9	9,5	10,5	11	10	9
$I_{02}$	А	1,0	1,5	2,0	1,7	1,8	1,4	1,3	1,2	1,1
$I_1$	А	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	4,9	4,8	4,7

$I_5$	A	3,0	3,1	3,0	2,9	3,0	3,1	2,9	3,1	2,9
$I_7$	A	2,0	2,1	2,2	2,1	2,0	1,9	2,0	2,1	2,2
$I_{11}$	A	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	0,9	1,0	1,1	0,9
$I_{13}$	A	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4

Для всех вариантов практического занятия № 6 принимаются одинаковые значения для следующих параметров:  $w = 10$ ;  $p = 2$ ;  $\delta = 0,2$  мм;  $K_{об} = 0,9$ ;  $K_c = 1,2$ .