

## ИЗМЕНЕНИЕ НУЛЕВОГО СИГНАЛА ИНДУКЦИОННЫХ ТАХОГЕНЕРАТОРОВ С ПОЛЫМ РОТОРОМ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ ТЕХНОЛОГИЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАШИНЫ

А. А. КАМЕНСКИЙ

Повышение требований к точности выходных параметров индукционных тахогенераторов вызывает необходимость исследования и оценки технологических факторов, оказывающих влияние на точностные характеристики, особенно на нулевой сигнал.

Технологические факторы влияют на погрешность формы, размеров и физических свойств отдельных узлов и деталей. Пооперационный контроль обмоток машин позволяет полностью исключить погрешности, связанные с неточностью изготовления обмоток и наличием короткозамкнутых витков. Поэтому основное влияние на нулевой сигнал оказывают неравномерность воздушного зазора, магнитная асимметрия пакетов магнитопровода и электрическая асимметрия полого ротора [1].

Теоретически и экспериментально из всей гаммы погрешностей достаточно полно исследовалось только влияние неравномерности воздушного зазора на нулевой сигнал [2].

В связи с этим представляло интерес определить влияние магнитной асимметрии пакетов на нулевой сигнал.

При аналитическом рассмотрении влияния некоторых факторов на нулевой сигнал для удобства анализа могут быть приняты следующие допущения:

1 — емкостные связи между обмотками, расположенными на статоре, отсутствуют;

2 — полый ротор симметричен;

3 — пакеты магнитопровода гладкие;

4 — поле в зазоре плоскопараллельное.

Представляя намагничивающую силу ( $H$  С) основной гармоникой и считая, что магнитное сопротивление влияет только на пространственное распределение магнитного потока, магнитную индукцию вдоль точки статора можно записать следующим образом [3]:

$$B(x) = \frac{F_1 \cos Px - F_0}{R_0 [1 + \rho_k \cos(kx - x_{ок})]}, \quad (1)$$

где  $F_1$  — амплитуда основной гармоники намагничивающей силы;  
 $F_0$  — магнитный потенциал внутреннего пакета магнитопровода;  
 $P$  — число пар полюсов;  
 $x$  — текущая линейная координата по зазору;  
 $R_0$  — среднее магнитное сопротивление цепи;

$\rho_k$  — относительная амплитуда  $k^{\text{ой}}$  гармоники, учитывающей неравномерность магнитного сопротивления цепи вдоль расточки статора, причем  $\frac{\rho_k}{R_0} \ll 1$ ;

$x_{\text{ок}}$  — пространственная фаза сдвига  $k^{\text{ой}}$  гармоники относительно оси обмотки возбуждения.

Анализ выражения (1) для индукции  $B(x)$  в зазоре, полученной при разложении (1) в ряд Маклорена и пренебрежении членами выше второго порядка, показывает, что в связи с неравномерностью магнитного сопротивления появляются гармоники намагничивающей силы, сдвинутые относительно основной гармоники обмотки возбуждения на 90 электрических градусов.

Магнитный потенциал  $F_0$  неподвижного сердечника находится из условия непрерывности силовых линий магнитного поля вдоль расточки статора.

Аналитическое выражение для нулевого сигнала, возникающего вследствие неравномерности магнитного сопротивления, при общепринятых допущениях [3] с учетом 1 и 3 гармоник имеет следующее выражение:

$$E_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} W_c K_{\text{об}} f \Phi_0 \frac{\rho_k^2}{6} S m 2x_{\text{ок}}, \quad \text{при } P = K \quad (2)$$

$$E_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} W_c K_{\text{об}} f \Phi_0 \left( -\frac{4}{3} \rho_k S m x_{\text{ок}} + \frac{4}{15} \rho_k^2 S m 2x_{\text{ок}} \right), \quad \text{при } P = \frac{K}{2} \quad (3).$$

$$E_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} W_c K_{\text{об}} f \Phi_0 \frac{8}{63} \rho_k^2 S m 2x_{\text{ок}}, \quad \text{при } P = \frac{K}{3} \quad (4).$$

$$E_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} W_c K_{\text{об}} f \Phi_0 \left( -\frac{8}{15} \rho_0 S m x_{\text{ок}} + \frac{8}{63} \rho_k^2 S m 2x_{\text{ок}} \right), \quad \text{при } P = \frac{K}{4} \quad (5)$$

$E_0 = 0$  при  $P = 2k, 3k$  и ряде других соотношений.

Выражения для нулевого сигнала (2—5) справедливы при неравномерности магнитного сопротивления, вызванной погрешностью воздушного зазора. Если неравномерность магнитного сопротивления обусловлена магнитной асимметрией пакетов магнитопровода, то в первом приближении нулевой сигнал  $E'_0$  будет пропорционален коэффициенту  $K_\mu - 1$ , показывающему отношение сопротивлений пакетов магнитопровода и воздушного зазора.

$$K_\mu - 1 = Z_\mu G_0,$$

где  $Z_\mu$  — магнитное сопротивление пакетов магнитопровода;

$G_0$  — магнитная проводимость воздушного зазора.

Нулевой сигнал  $E_0$  равен

$$E'_0 = (K_\mu - 1) E_0.$$

Как показывают формулы (2—5), нулевой сигнал зависит от соотношения числа пар полюсов  $P$  и порядка гармоники асимметрии  $K$ . Наиболее характерной погрешностью воздушного зазора можно считать овальность ( $K = 2$ ), которая должна сказываться наиболее сильно на двухполюсных машинах ( $P = 1$ ). Магнитная асимметрия пакетов, как показал эксперимент, обычно выражается гармоникой первого и иногда второго порядка и, следовательно, также влияет на нулевой сигнал.

В реальной машине все погрешности, а именно: погрешность воздушного зазора, магнитная асимметрия магнитопровода и электрическая асимметрия полого ротора действуют одновременно. Поэтому исследование влияния магнитной асимметрии пакетов на нулевой сигнал проводилось экспериментально-статистическим методом (4) — определялась степень и форма влияния исследуемого параметра на выходной.

Пакеты магнитопровода изготовлялись путем склеивания под давлением. Обжитие пакетов производилось на прессе до упора, т. е. с ограничением по высоте. Величина давления около  $50 \text{ кг/см}^2$ .

Затем пакеты были подвергнуты необходимой механической обработке. Перед сборкой пакеты статора были разбиты на три группы в зависимости от величины магнитной асимметрии пакета (асимметрии спинки пакета статора).

$$\text{I группа} - \Delta\mu = 0 \div 0,145;$$

$$\text{II группа} - \Delta\mu = 0,145 \div 0,29;$$

$$\text{III группа} - \Delta\mu = 0,29 \div 0,435,$$

где

$$\Delta\mu = \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{\mu_{\max} + \mu_{\min}}.$$

Влияние магнитной асимметрии пакета статора на нулевой сигнал определялось в процессе сборки после следующих операций:

установки пакета в корпус и регулировки его «технологическим» сердечником;

установки в корпус двигатель-генератора серийного неподвижного сердечника;

установки полого ротора.

Статистический анализ экспериментальных данных показал, что форма влияния магнитной анизотропии пакета статора на нулевой сигнал практически имеет слабо выраженный нелинейный характер и достаточно хорошо описывается прямолинейной зависимостью. Коэффициент корреляции между  $E_0$  и  $\Delta\mu$ , определяющий степень влияния магнитной асимметрии (без учета сдвига фазы гармоники магнитной асимметрии относительно оси обмотки возбуждения) на нулевой сигнал, значительно изменяется по мере увеличения действующих погрешностей.

Нулевой сигнал и коэффициент корреляции в машинах с технологическим сердечником без полого ротора:

$$E_0 = 32 + 128,6 \Delta\mu \text{ (мВ)},$$

$$r = 0,5.$$

Нулевой сигнал и коэффициент корреляции в машинах, собранных без полого ротора:

$$E_0 = 31,3 + 110,6 \Delta\mu \text{ (мВ)},$$

$$r = 0,38$$

Нулевой сигнал и коэффициент корреляции в собранных машинах:

$$E_0 = 53,21 + 91,9 \Delta\mu \text{ (мВ)},$$

$$r = 0,24$$

Анализ величины коэффициента корреляции показывает, что в собранной машине 10—15% величины нулевого сигнала при данном технологическом процессе обусловлено магнитной асимметрией спинки пакета статора. Основное влияние на нулевой сигнал оказывает неравномер-

ность воздушного зазора и электрическая асимметрия полого ротора. Электромагнитная асимметрия неподвижного сердечника на нулевой сигнал машины влияет незначительно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. М. Лопухина, Г. С. Сомихина. Асинхронные микромашины с полым ротором, «Энергия», 1967.
  2. Ю. М. Пульер. Индукционные электромеханические элементы вычислительных и дистанционно-следающих систем, Машиностроение, 1964.
  3. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины, «Энергия» 1965.
  4. Я. И. Лукомский. Теория корреляции и ее применение к анализу производства, Госстатиздат, 1961.
-