

ЗАМЕНА КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДВУХФАЗНОЙ

Е. В. КОНОНЕНКО

Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники

При исследовании различных переходных режимов работы асинхронных двигателей в тех случаях, когда не ставится задача определения токов в стержнях ротора, короткозамкнутая обмотка при составлении уравнений обычно заменяется двумя эквивалентными обмотками. При этом предполагается, что эквивалентные обмотки являются сосредоточенными и расположенными по взаимно перпендикулярным осям (продольной и поперечной), а ширина катушек обмоток равна полюсному делению.

Однако замена короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя эквивалентной двухфазной в литературе не получила достаточного освещения. Часто при рассмотрении переходных процессов асинхронных короткозамкнутых двигателей предполагается, что на роторе имеется симметричная трехфазная обмотка, параметры которой приведены к обмотке статора. Такой подход затрудняет определение связи между расчетными параметрами, применяемыми в теории установившегося режима, и параметрами, применяемыми в теории переходных процессов. В связи с этим в данной статье рассматривается вопрос о замене короткозамкнутой обмотки ротора эквивалентной двухфазной обмоткой.

Так как при составлении уравнений равновесия напряжений асинхронных машин учитываются лишь основные гармонические составляющие, то при замене реальных обмоток эквивалентными следует исходить из равенства основных гармонических намагничивающих сил (н. с.) реальной и эквивалентной обмоток. Для определения н. с., создаваемых реальными обмотками ротора, необходимо знать пространственное распределение токов в стержнях обмотки. В первом приближении распределение составляющих токов по осям d и q в стержнях роторной обмотки принимается синусоидальным. Приравнивая амплитуды основных гармонических н. с., созданных продольными составляющими токов в стержнях и эквивалентной обмоткой по продольной оси, полученных так же, как и в синхронных машинах [1], найдем, что число витков эквивалентной обмотки ротора по продольной оси на один полюс будет равно

$$W_{эд} = \frac{n_c}{4} \left(1 - \frac{\sin n_c \alpha_c}{n_c \sin \alpha_c} \right), \quad (1)$$

где α_c — угол сдвига пазов ротора в электрических радианах;
 n_c — число пазов ротора, приходящееся на один полюс.

Так как пазы короткозамкнутой обмотки распределены равномерно по окружности ротора, то

$$\alpha_c = \frac{\pi}{p_c}; \quad n_c = \frac{Z_2}{2p}$$

Нетрудно убедиться, что вследствие симметрии ротора число витков эквивалентных обмоток по продольной и поперечной осям одинаковы и будут равны

$$W_\varepsilon = W_{\varepsilon d} = W_{\varepsilon q} = \frac{Z_2}{8p} \quad (2)$$

Для того, чтобы при аналитических исследованиях можно было воспользоваться уравнениями эквивалентных роторных обмоток, необходимо определить параметры этих обмоток. При этом достаточно найти их активные сопротивления и индуктивные сопротивления рассеяния, так как сопротивления взаимной индукции между эквивалентными обмотками ротора и обмотками статора равны сопротивлениям взаимной индукции между реальными обмотками. При замене реальных обмоток предполагалось, что энергетические соотношения в машине должны оставаться без изменений.

В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором активные сопротивления и индуктивные сопротивления рассеяния эквивалентных обмоток можно рассчитать по тем же формулам, что и в синхронных машинах [1]. Так как в асинхронных двигателях эквивалентные обмотки по продольной и поперечной осям одинаковы, то можно ограничиться расчетом параметров лишь для обмотки по продольной оси.

Однако расчетные формулы для асинхронных двигателей можно упростить. При преобразованиях вначале допустим, что активным сопротивлением элементов короткозамыкающего кольца можно пренебречь. Так как сопротивление всех стержней одинаково, то активное сопротивление эквивалентной обмотки можно представить в виде

$$R_r = 4p \cdot R_c \left(\sin^2 \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_1}{2} + \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_2}{2} + \dots + \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_k}{2} + \dots \right) = pR_c \left(n_c - \frac{\sin n_c \alpha_c}{\sin \alpha_c} \right) \quad (3)$$

или

$$R_r = R_c \cdot \frac{Z_2}{2}, \quad (4)$$

где R_c — активное сопротивление стержня.

Активное сопротивление эквивалентных обмоток ротора, приведенное к обмотке статора, равно

$$r_2 = R_r \cdot m_i m_u, \quad (5)$$

где коэффициенты проведения токов m_i и напряжений m_u асинхронного двигателя в соответствии с общими законами приведения обмоток электрических машин можно представить в виде [2]

$$m_i = \frac{m_1}{2} \cdot \frac{W_1 \cdot K_{об1}}{2p \cdot W_\varepsilon} = \frac{2m_1 \cdot W_1 \cdot K_{об1}}{Z_2}, \quad (6)$$

$$m_u = \frac{2}{m_1} \cdot m_i = \frac{4W_1 \cdot K_{об1}}{Z_2}. \quad (7)$$

Аналогично можно найти расчетные формулы для индуктивности рассеяния эквивалентной обмотки. Если при преобразованиях пренебречь

рассеянием элементов короткозамыкающего кольца, то индуктивность рассеяния эквивалентной обмотки можно представить в виде

$$L_{\sigma r} = 4p \cdot L_c \left(\sin^2 \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_1}{2} + \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_2}{2} + \dots + \right. \\ \left. + \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_k}{2} + \dots \right) = pL_c \left(n_c - \frac{\sin n_c \alpha_c}{\sin \alpha_c} \right) \quad (8)$$

или

$$L_{\sigma r} = L_c \cdot \frac{Z_2}{2}, \quad (9)$$

где L_c — индуктивность стержня обмотки ротора.

Индуктивное сопротивление рассеяния эквивалентных обмоток ротора асинхронного двигателя, приведенное к обмотке статора, равно

$$x_{\sigma r} = 2\pi f \cdot L_{\sigma r} \cdot m_i \cdot m_u. \quad (10)$$

Подставляя в (5) и (10) значение коэффициентов приведения m_i и m_u , получим

$$r_2 = R_c \cdot \frac{Z_2}{2} \cdot \frac{8m_1 \cdot (W_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2^2} = R_c \cdot \frac{4m_1 (W_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2}, \quad (11)$$

$$x_{\sigma r} = x_c \cdot \frac{Z_2}{2} \cdot \frac{8m_1 \cdot (W_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2^2} = x_c \frac{4m_1 (W_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2}, \quad (12)$$

где $x_c = 2\pi f L_{\sigma r}$ — индуктивное сопротивление рассеяния стержня обмотки ротора.

Сравнивая выражения (11) и (12) с общеизвестными формулами для расчета активного сопротивления и индуктивного сопротивления рассеяния фазы вторичной обмотки асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, приведенных к обмотке статора, при тех же допущениях видим, что они одинаковы. Следовательно, при пользовании формулами (11) и (12) для повышения точности расчета сопротивления R_c и x_c нужно определять с учетом влияния короткозамкнутых колец, как это принято в асинхронных машинах.

Из полученных результатов следует, что при расчете активного сопротивления и индуктивного сопротивления рассеяния эквивалентных обмоток ротора асинхронного двигателя, приведенных к обмотке статора, можно воспользоваться известными из общей теории асинхронных машин формулами. Однако необходимо помнить, что коэффициенты приведения сопротивлений $m_z = m_i m_u$ двухфазных эквивалентных обмоток (6) и (7) отличаются от рассматриваемого в общем курсе случая, когда в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором число фаз роторной обмотки принимается равным Z_2 , а число витков фазы равным $1/2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. В. Кононенко. Синхронные реактивные машины. Изд-во «Энергия», 1970.
2. Я. Б. Данилевич, В. В. Домбровский, Е. Я. Казовский. Параметры электрических машин переменного тока. Изд-во «Наука», 1965.