

## ПРИВЕДЕНИЕ РОТОРНЫХ ОБМОТОК СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ МАШИН

Е. В. КОНОНЕНКО

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В синхронных реактивных машинах для целей асинхронного пуска и повышения устойчивости работы на роторе помещается специальная короткозамкнутая обмотка. Обычно роторная обмотка представляет собой литую алюминиевую беличью клетку. Как правило, алюмином заливаются не только пазы, имеющиеся в сердечнике ротора, но также и междуполюсные пространства. Два из возможных вариантов конструкции ротора представлены на рис. 1. При применении теории двух реакций роторная обмотка может быть представлена двумя системами короткозамкнутых контуров, магнитные оси которых совпадают с осями ротора  $d$  и  $q$ .

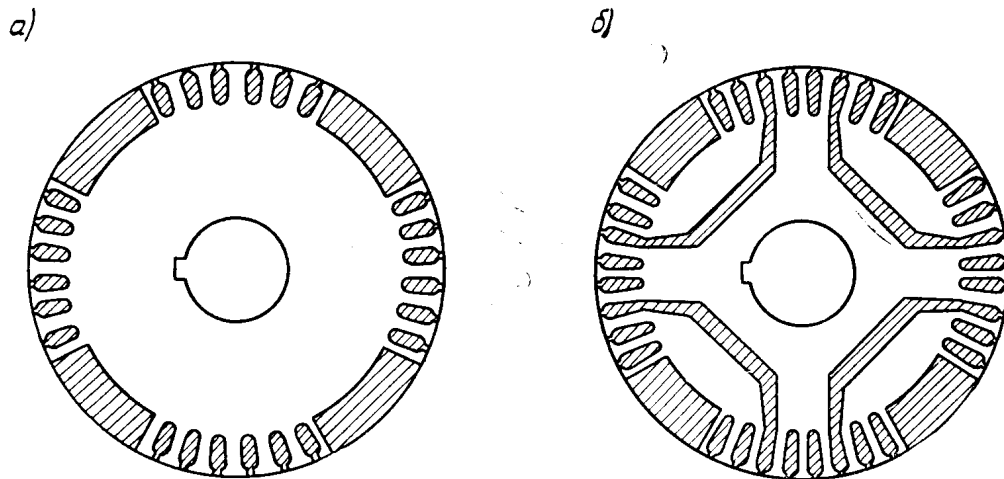


Рис. 1. Конструкции ротора синхронных реактивных машин: а) обычный ротор; б) усовершенствованный ротор.

При исследовании пусковых и нестационарных переходных процессов реальные многоконтурные роторные обмотки по продольной и поперечной осям синхронных реактивных машин для упрощения исследований целесообразно заменить двумя эквивалентными обмотками, ширина которых равна полюсному делению. При замене реальных роторных обмоток эквивалентными необходимо иметь в виду, что такие преобразования не должны повлиять на процессы, происходящие в машине.

Роторные обмотки являются распределенными. При аналитических

исследованиях обычно учитываются лишь основные гармонические составляющие намагниченных сил (н. с.), создаваемые распределенными обмотками. В соответствии с этим при замене реальных обмоток ротора по осям  $d$  и  $q$  эквивалентными будем исходить из равенства основных гармонических н. с., созданных обмотками. Для определения н. с., создаваемых реальными обмотками ротора, необходимо найти пространственное распределение токов в стержнях роторной обмотки. В первом приближении можно принять распределение составляющих токов по осям  $d$  и  $q$  в стержнях роторной обмотки синусоидальным [1, 2]. Тогда н. с., создаваемые обмотками ротора, можно определить на основании схемы, представленной на рис. 2.

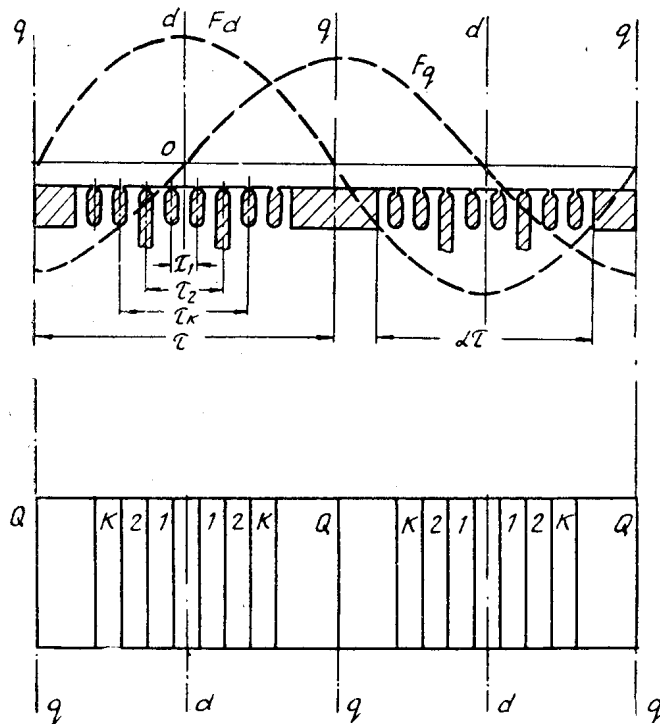


Рис. 2. Схема роторной обмотки синхронной реактивной машины при четном числе стержней на полюсе.

Составляющие токов в стержнях обмотки ротора по продольной оси индуктируются пульсирующим магнитным полем, создаваемым н. с. обмотки статора  $F_d$ . При синусоидальном распределении токов в стержнях вдоль поверхности ротора максимальное значение токов  $I_{rd}$  будет в стержнях, смещенных от оси поля на расстоянии  $\frac{\tau}{2}$ , т. е. в стержнях, расположенных в междуполюсном пространстве. Ток в любой паре стержней, смещенных от оси полюса на расстоянии  $\frac{\tau_k}{2}$  и образующей короткозамкнутый контур, будет равен

$$I_{kd} = I_{rd} \sin \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_k}{2}. \quad (1)$$

Амплитуда основной гармонической н. с., созданная токами, протекающими в  $k$ -той паре стержней, определяется выражением

$$F_{kd} = \frac{4}{\pi} I_{rd} \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_k}{2}. \quad (2)$$

Амплитуда основной гармонической н. с., созданная продольными составляющими токов в стержнях, на один полюс определяется как сумма

$$F_{rd1} = F_{1d} + F_{2d} + \dots + F_{kd} + \dots + F_{Qd} = \frac{4}{\pi} I_{rd} \left( \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_1}{2} + \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_2}{2} + \dots + \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_k}{2} \right) + \frac{2}{\pi} I_{rd} \quad (3)$$

Пусть количество короткозамкнутых контуров на полюсном наконечнике равно  $n$ . В синхронных реактивных машинах стержни на полюсном наконечнике распределяются равномерно. Угол между двумя соседними стержнями обозначим через  $\alpha_c$ , количество стержней на полюсном наконечнике — через  $n_c$ . В этом случае независимо от количества стержней на полюсе (четном и или нечетном)

$$\sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_1}{2} + \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_2}{2} + \dots + \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_n}{2} = \frac{n_c}{4} - \frac{\sin n_c \alpha_c}{4 \sin \alpha_c} \quad (4)$$

Тогда уравнение (3) можно представить в виде:

$$F_{rd1} = \frac{4}{\pi} I_{rd} \left( \frac{n_c}{4} - \frac{\sin n_c \alpha_c}{4 \sin \alpha_c} + \frac{1}{2} \right) \quad (5)$$

Если принять, что по эквивалентной обмотке ротора по оси  $d$  протекает ток, максимальное значение которого равно  $I_{rd}$ , то амплитуда первой гармонической н. с., создаваемая этой обмоткой, определяется выражением

$$F_{эд1} = \frac{4}{\pi} I_{rd} \cdot W_{эд} \quad (6)$$

где  $W_{эд}$  — количество витков эквивалентной обмотки ротора.

Приравнявая, согласно принятым условиям приведения, левые части уравнений (5) и (6), найдем, что

$$W_{эд} = \frac{1}{4} \left( n_c + 2 - \frac{\sin n_c \alpha_c}{\sin \alpha_c} \right) \quad (7)$$

Аналогичные преобразования можно выполнить и для роторной обмотки по поперечной оси. Составляющие токов в стержнях обмотки ротора по поперечной оси индуцируются пульсирующим магнитным полем, созданным н. с.  $F_q$  (рис. 2). При косинусоидальном распределении токов в стержнях обмотки ротора ток в любой паре стержней, образующей короткозамкнутый контур по оси  $q$ , определяется выражением:

$$I_{kq} = I_{rq} \cos \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_k}{2} \quad (8)$$

При четном числе стержней на полюсном наконечнике амплитуда основной гармонической н. с., созданная поперечными составляющими токов в стержнях, на один полюс определяется как сумма первых гармонических н. с. короткозамкнутых контуров по оси  $q$ .

$$\begin{aligned} F_{rq1} &= F_{1q} + F_{2q} + \dots + F_{kq} + \dots + F_{nq} = \\ &= \frac{4}{\pi} I_{rq} \left( \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_1}{2} + \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_2}{2} + \dots + \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_n}{2} \right) = \\ &= \frac{4}{\pi} I_{rq} \left( \frac{n_c}{4} + \frac{\sin n_c \alpha_c}{4 \sin \alpha_c} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Можно доказать, что при нечетном числе стержней на полюс уравнение для н. с. остается без изменений.

Амплитуда основной гармонической, создаваемая эквивалентной обмоткой ротора по оси  $q$  при протекании по ней тока  $I_{rq}$ , определяется выражением:

$$F_{\varepsilon q1} = \frac{4}{\pi} I_{rq} W_{\varepsilon q}, \quad (10)$$

где  $W_{\varepsilon q}$  — количество витков эквивалентной обмотки ротора по поперечной оси.

Сопоставляя уравнения (9) и (10), находим

$$W_{\varepsilon q} = \frac{1}{4} \left( n_c + \frac{\sin n_c \alpha_c}{\sin \alpha_c} \right). \quad (11)$$

В синхронных реактивных машинах обмотки статора и ротора связаны электромагнитно. Для того чтобы при расчетах не выбирать различные системы базисных величин для обмоток статора и ротора, а также при составлении эквивалентных схем замещения, необходимо обмотки ротора приводить к обмоткам статора. При приведении обмоток необходимо руководствоваться условием, что энергетические соотношения в машине не должны зависеть от приведения.

Для приведения эквивалентных роторных обмоток к статорным необходимо определить коэффициенты приведения токов  $m_I$ , напряжений  $m_U$  и сопротивлений  $m_r = m_I \cdot m_U$ , которые позволяют пересчитать эквивалентные обмотки ротора на количество витков и фаз обмотки статора.

Учитывая, что распределение н.с., создаваемых роторными обмотками, принято синусоидальным, коэффициент  $m_I$  определяется исходя из равенства основных гармонических н.с. приведенной и эквивалентной обмоток.

Максимальные значения токов в эквивалентных обмотках ротора равны  $I_{rd}$  и  $I_{rq}$ , а их приведенные значения обозначим через  $I_{rd}'$  и  $I_{rq}'$ . Тогда амплитуды первых гармонических н.с., созданных обмоткой статора при протекании по обмотке токов  $I_{rd}'$  и  $I_{rq}'$ , будут равны:

$$F_{ad1} = \frac{m}{2} \frac{4}{\pi} \frac{W_1 k_{об1}}{2p} I_{rd}', \quad (12)$$

$$F_{aq1} = \frac{m}{2} \frac{4}{\pi} \frac{W_1 k_{об1}}{2p} I_{rq}', \quad (13)$$

где  $W_1$ ,  $k_{об1}$ ,  $m$  — число витков, обмоточный коэффициент и число фаз обмотки статора;

$p$  — число пар полюсов.

Приравнивая левые части уравнений (6) и (12), (10) и (13), получаем:

$$m_{Id} = \frac{I_{rd}}{I_{rd}'} = \frac{m}{2} \frac{W_1 k_{об1}}{2p W_{\varepsilon d}}, \quad (14)$$

$$m_{Iq} = \frac{I_{rq}}{I_{rq}'} = \frac{m}{2} \frac{W_1 k_{об1}}{2p W_{\varepsilon q}}. \quad (15)$$

Коэффициенты приведения токов (14), (15) получены из условия равенства основных гармонических н.с. эквивалентных и приведенных обмоток ротора. Нетрудно доказать, что если н.с., создаваемая обмоткой ротора, изменяется в пространстве по синусоидальному закону, выражения для коэффициентов приведения (14) и (15) при принятых

допущениях не изменятся, если их определять исходя из равенства основных гармонических индукций в воздушном зазоре, создаваемых реальной и приведенной обмотками ротора.

При определении коэффициентов приведения напряжений  $m_{ud}$ ,  $m_{uq}$  необходимо руководствоваться общими правилами преобразования обмоток электрических машин [3].

При аналитических исследованиях синхронных реактивных машин применяется теория  $2T = x$  реакций. При преобразовании уравнений к осям  $d$  и  $q$  мощность обмотки статора уменьшается в  $\frac{m}{2}$  раза, а мощность обмотки ротора остается без изменений. В связи с этим взаимные индуктивности между фазовыми обмотками статора и обмотками ротора в преобразованных уравнениях становятся необратимыми. Для восстановления обратимости взаимных индуктивностей мощность приведенных роторных обмоток нужно уменьшить в  $\frac{m}{2}$  раза.

Коэффициенты приведения токов получены независимо от рассмотренных выше условий. Для того, чтобы взаимные индуктивности в уравнениях синхронных реактивных машин были обратимыми, необходимо коэффициенты приведения напряжений выбрать равными:

$$m_{ud} = \frac{2}{m} \quad m_{Id} = \frac{W_1 k_{об1}}{2p W_{эд}}, \quad (16)$$

$$m_{uq} = \frac{2}{m} \quad m_{Iq} = \frac{W_1 k_{об1}}{2p W_{эq}} \quad (17)$$

Сопротивление взаимоиндукции обмотки статора синхронных реактивных машин по оси  $d$  можно определить из равенства

$$x_{ad} = 2\pi f_1 \frac{\psi_{ad1}}{i_d}, \quad (18)$$

где  $\psi_{ad1}$  — потокосцепления, созданные основной гармонической индукцией в воздушном зазоре, которая возникает при протекании по обмотке статора тока  $i_d$ .

$$\psi_{ad1} = W_1 k_{об1} \Phi_{ad1} = \frac{6}{\pi^2} \frac{(W_1 k_{об1})^2}{p} \tau l \frac{\mu_0 k_d}{k_\delta k_{\mu d} \delta}. \quad (19)$$

Тогда

$$x_{ad} = \frac{4}{\pi} m f_1 \left( \frac{W_1 k_{об1}}{p} \right)^2 \tau l \frac{\mu_0 k_d}{k_\delta k_{\mu d} \delta} [\text{ом}]. \quad (20)$$

Сопротивление взаимоиндукции обмотки статора на оси  $q$  можно по аналогии записать в виде:

$$x_{ad} = \frac{4}{\pi} m f_1 \frac{(W_1 k_{об1})^2}{p} \tau l \frac{\mu_0 k_d}{k_\delta k_{\mu d} \delta} [\text{ом}], \quad (21)$$

где  $k_d, k_q$  — коэффициенты формы поля по осям  $d$  и  $q$ ;

$k_{\mu d}, k_{\mu q}$  — коэффициенты насыщения магнитной цепи по осям  $d$  и  $q$ ;

$\delta, \tau, l$  — воздушный зазор, полюсное деление и расчетная длина машины.

Нетрудно доказать, что при принятых выше коэффициентах приведения сопротивления взаимоиндукции между эквивалентными обмот-

ками ротора и обмотками статора по осям  $d$  и  $q$  можно рассчитать по формулам (20) и (21), так как

$$X_{ard} = X_{ad}, \quad X_{arq} = X_{aq}. \quad (22)$$

Формулы, приведенные в настоящей работе, позволяют привести реальные роторные обмотки по продольной и поперечной осям к эквивалентным и обмоткам статора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Е. Телаат. Новый подход к определению индуктивных сопротивлений синхронной машины, ГЭИ, 1959.
2. Я. Б. Данилевич, В. В. Домбровский, Е. Я. Казовский. Параметры электрических машин переменного тока, Наука, 1965.
3. И. И. Талалов. Преобразование цепей при анализе электрических машин, Электричество, № 4, 1961.