

## К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНОЙ ОБМОТКИ СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Е. В. КОНОНЕНКО, Т. В. ЧЕШЕВА

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

При расчете параметров синхронных реактивных двигателей (СРД) роторная обмотка может рассматриваться следующими двумя способами. Согласно первому реальные многоконтурные роторные обмотки по осям  $d$  и  $q$  заменяются двумя эквивалентными обмотками, ширина которых равна полюсному делению. Магнитная ось одной из них совпадает с продольной осью  $d$ , магнитная ось другой совпадает с поперечной осью  $q$  [4, 6, 10 и др.]. Другой способ состоит в том, что каждые два стержня роторной обмотки, расположенные симметрично относительно осей  $d$  и  $q$ , образуют отдельную цепь роторной обмотки, соответственно по осям  $d$  и  $q$  [1, 2, 3, 4 и др.]. Первый способ используется для упрощения аналитических исследований и в сравнении со вторым в дальнейшем будем называть упрощенным. При замене реальных роторных обмоток эквивалентными считают, что распределение составляющих токов по осям  $d$  и  $q$  в стержнях роторной обмотки синусоидально.

В тех случаях, когда возникает необходимость исследования процессов в самой роторной обмотке, упрощенное представление ее двумя эквивалентными контурами оказывается недостаточным [6, 7]. На роторе усовершенствованных СРД размещается распределенная короткозамкнутая обмотка, которая располагается в пазах разного сечения: овальных, междуполюсных пространствах и в пазах сложной формы, полученных с помощью дополнительных внутренних пазов, соединяющих два паза, симметрично расположенных относительно оси  $q$ . Это обстоятельство ставит под сомнение принятое в упрощенном методе допущение синусоидального пространственного распределения составляющих токов в стержнях ротора по осям  $d$  и  $q$ . Это значит, что для получения методики расчета, обеспечивающей достаточную точность для практического пользования, необходимо провести аналитические исследования не только по упрощенному способу, но и точным методом. Естественно, что точный метод очень громоздкий и трудоемкий, но для оценки степени погрешности упрощенного метода он необходим.

### Приведение цепей

При появлении трансформаторных связей между обмотками статора и ротора в последней будут наводиться токи. Так как в усовершенствованном СРД стержни роторной обмотки расположены симметрично относительно осей  $d$  и  $q$ , то стержни, расположенные на оди-

наковых расстояниях от осей, будут обтекаться токами, одинаковыми по величине и противоположными по направлению (процессы по осям  $d$  и  $q$  рассматриваются отдельно) [12]. Поэтому можно считать, что они образуют отдельные цепи.

Чтобы при расчетах не выбирать различные системы базисных величин для обмоток статора и ротора, а также при составлении точных схем замещения необходимо обмотки ротора приводить к обмоткам статора [5]. Для приведения отдельных роторных цепей к статорной обмотке необходимо определить коэффициенты приведения токов  $k_i$ , напряжений  $k_u$  и сопротивлений  $k_z = \frac{k_u}{k_i}$  для каждой роторной цепи, образуемой в осях ротора  $d$  и  $q$ . Принимаем такую систему коэффициентов приведения, которая обеспечила бы обратимость взаимных индуктивностей между фазами преобразованных цепей и связанными с ними цепями роторной обмотки, то есть

$$k_u k_i = \frac{2}{m}, \quad (1)$$

где  $m$  — число фаз обмотки статора.

Определяем коэффициент приведения по току  $k_i$  из условия равенства основных гармонических н. с. приведенной и реальной цепи [4, 7]. Максимальные значения токов в отдельно взятых цепях роторной обмотки будем обозначать

$$\begin{aligned} I_{rd1}, I_{rd2}, \dots, I_{rdk} & \text{ — по продольной оси,} \\ I_{rq1}, I_{rq2}, \dots, I_{rqk} & \text{ — по поперечной оси,} \end{aligned}$$

а приведенные значения будем обозначать со штрихом.

Амплитуды первых гармонических н. с., созданных обмоткой статора при протекании по ней тока  $K$ -й цепи ротора, по осям  $d$  и  $q$  соответственно

$$F_{ad1(ck)} = \frac{m}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{W_1 K_{об1}}{2p} I'_{rdk}, \quad (2)$$

$$F_{aq1(ck)} = \frac{m}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{W_1 K_{об1}}{2p} I'_{rqk}, \quad (3)$$

где  $m$ ,  $W_1$ ,  $K_{об1}$  — соответственно число фаз, количество витков и обмоточный коэффициент обмотки статора;  
 $p$  — число пар полюсов.

Н. с. отдельно взятой цепи ротора, созданная при протекании по ней тока  $I_{rdk}$ , изменяется вдоль воздушного зазора в виде прямоугольной волны (рис. 1) с высотой  $F_{rdk}$  или  $F_{rqk}$ . Амплитуда первой гармонической н. с., созданной  $K$ -й цепью при протекании по ней тока  $I_{rdk}$  или  $I_{rqk}$ , будут соответственно иметь вид:

$$F_{rd1(k)} = \frac{4}{\pi} I_{rdk} \cdot \sin \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_k}{2}, \quad (4)$$

$$F_{rq1(k)} = \frac{4}{\pi} I_{rqk} \cdot \cos \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_k}{2}, \quad (5)$$

где  $\tau_k$  — шаг  $K$ -й цепи роторной обмотки.  
 $\tau$  — полюсное деление.

Приравнявая левые части (2) и (4), (3) и (5), получаем коэффициенты приведения по току для любой роторной цепи соответственно по осям  $d$  и  $q$ :

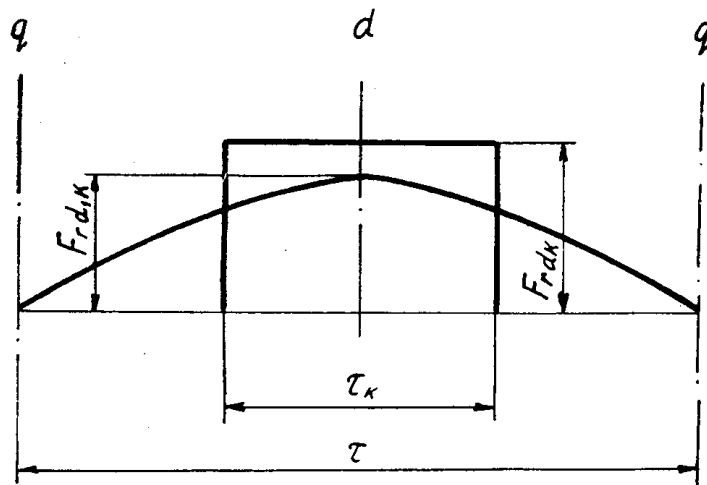


Рис. 1. Н. с. цепи роторной обмотки

$$k_{idk} = \frac{I'_{rdk}}{I_{rdk}} = \frac{2}{m} \cdot \frac{2p}{W_1 K_{об1}} \cdot \sin \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_k}{2}, \quad (6)$$

$$k_{iqk} = \frac{I'_{rqk}}{I_{rqk}} = \frac{2}{m} \cdot \frac{2p}{W_1 K_{об1}} \cdot \cos \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_k}{2}. \quad (7)$$

Из уравнений (6) и (7) видно, что каждая отдельно взятая цепь роторной обмотки по осям  $d$  и  $q$  имеет свои коэффициенты приведения, значения которых изменяются в зависимости от шага отдельно взятой цепи. Коэффициенты приведения напряжений и сопротивлений определяются исходя из выражения (1):

$$k_{udk} = \frac{2}{m} \cdot \frac{1}{k_{idk}} = \frac{W_1 K_{об1}}{2p} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_k}{2}} \quad (8)$$

$$k_{uqk} = \frac{2}{m} \cdot \frac{1}{k_{iqk}} = \frac{W_1 K_{об1}}{2p} \cdot \frac{1}{\cos \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_k}{2}}, \quad (9)$$

$$k_{rdk} = \frac{k_{udk}}{k_{idk}} = \frac{m}{2} \cdot \left( \frac{W_1 K_{об1}}{2p} \right)^2 \frac{1}{\sin^2 \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_k}{2}}, \quad (10)$$

$$k_{rqk} = \frac{k_{uqk}}{k_{iqk}} = \frac{m}{2} \cdot \left( \frac{W_1 K_{об1}}{2p} \right)^2 \cdot \frac{1}{\cos^2 \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\tau_k}{2}}. \quad (11)$$

### Основные уравнения

Основные уравнения для усовершенствованного СРД, имеющего на одном полюсном делении  $K$ -цепей, обычно записывают в относительных единицах. Для выражения всех величин в относительных единицах используются базисные единицы первичной цепи [7, 9]. Выбор базисных единиц для величин вторичных, роторных цепей производится неявно и определяется коэффициентами приведения.

Будем считать, что ускорение ротора незначительно, то есть ограничимся исследованием установившегося режима при несинхронной скорости вращения. Тогда система уравнений потокосцеплений обмот-

10

2

(12)

(13)

(14)

(15)

где  $K$  — количество роторных цепей на одном полюсном делении;

$$Z_{km} = \frac{R_{km}}{S} + jX_{km} \text{ — сопротивление взаимной индукции между цепями}$$
$$Z_{KK} = \frac{R_{KK}}{S} + jX_{KK} - \text{— полное сопротивление К-й цепи ротора.}$$

Преобразованные уравнения равновесия напряжений статора для установившегося асинхронного режима можно записать в виде:  
где

(16)

где

(17)

$x_d(j_s)$  и  $x_q(j_s)$  — установившиеся значения операторных сопротивлений по осям  $d$  и  $q$ .

Во всех случаях  $x_d(j_s)$  и  $x_q(j_s)$  могут быть выражены как отношения двух определителей, каждый из которых в развернутом виде представляет собой полином. Выражения для установившихся значений операторных сопротивлений могут быть получены следующим образом: решив систему (12) и (13) относительно потокосцеплений  $\psi_d$  и систему (14) и (15) относительно потокосцеплений  $\psi_q$ , получим:

(18)

$$\frac{\Delta Q}{\Delta q} \dot{q}, \quad (19)$$

где

$$\Delta_D = \begin{vmatrix} X_d & X_{a1d} & X_{a2d} & \dots & X_{akd} \\ X_{1ad} & Z_{11d} & Z_{12d} & \dots & Z_{1kd} \\ X_{2ad} & Z_{21d} & Z_{22d} & \dots & Z_{2kd} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{kad} & Z_{k1d} & Z_{k2d} & \dots & Z_{kkd} \end{vmatrix}, \quad (20)$$

$$\Delta_d = \begin{vmatrix} Z_{11d} & Z_{12d} & \dots & Z_{1kd} \\ Z_{21d} & Z_{22d} & \dots & Z_{2kd} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1d} & Z_{k2d} & \dots & Z_{kkd} \end{vmatrix}, \quad (21)$$

$$\Delta_Q = \begin{vmatrix} X_q & X_{a1q} & X_{a2q} & \dots & X_{akq} \\ X_{1aq} & Z_{11q} & Z_{12q} & \dots & Z_{1kq} \\ X_{2aq} & Z_{21q} & Z_{22q} & \dots & Z_{2kq} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{kaq} & Z_{k1q} & Z_{k2q} & \dots & Z_{kkq} \end{vmatrix}, \quad (22)$$

$$\Delta_q = \begin{vmatrix} Z_{11q} & Z_{12q} & \dots & Z_{1kq} \\ Z_{21q} & Z_{22q} & \dots & Z_{2kq} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1q} & Z_{k2q} & \dots & Z_{kkq} \end{vmatrix} \quad (23)$$

Тогда из уравнений (18) и (19) вместе с уравнениями (17) получим выражения для установившихся значений операторных сопротивлений:

$$x_d(js) = \frac{\Delta_D}{\Delta_d}; \quad (24) \quad x_q(js) = \frac{\Delta_Q}{\Delta_q}. \quad (25)$$

Выражения  $x_d(js)$  и  $x_q(js)$ , полученные в комплексной форме, позволяют сразу определить вещественные и мнимые части этих сопротивлений.

Сверхпереходные сопротивления по осям  $d$  и  $q$  определяются из выражений для  $x_d(js)$  и  $x_q(js)$  при условии, что активное сопротивление роторных контуров равно нулю. То есть

$$x_d'' = \frac{\Delta_D''}{\Delta_d''}; \quad (26) \quad x_q'' = \frac{\Delta_Q''}{\Delta_q''}, \quad (27)$$

где  $\Delta_D''$ ,  $\Delta_d''$ ,  $\Delta_Q''$  и  $\Delta_q''$  получены из уравнений (12)–(15) при  $R_{km}$  и  $R_{kk}=0$ .

Реактивное и активное сопротивление обмотки ротора по осям  $d$  и  $q$  можно определить из формул для операторных сопротивлений  $x_d(js)$  и  $x_q(js)$ , полученных упрощенным методом [6, 7 и др.]:

$$x_d(js) = x_d - \frac{X_{ad}^2}{X_{rd} + R_{zd}}, \quad (28)$$

$$x_q(js) = x_q - \frac{X_{aq}^2}{X_{rq} + R_{rq}}. \quad (29)$$

Если обозначить полное сопротивление роторной обмотки через

$$Z_{rd} = jX_{rd} + \frac{R_{rd}}{S} \text{ по оси } d \quad (30)$$

$$Z_{rq} = jX_{rq} + \frac{R_{rq}}{S} \text{ по оси } q, \quad (31)$$

то из формул (28), (29) можно записать

$$Z_{rd} = \frac{X_{ad}^2}{x_d - x_d(js)}, \quad (32) \quad Z_{rq} = \frac{X_{aq}^2}{x_q - x_q(js)}, \quad (33)$$

Комплексный метод расчета дает возможность сократить расчеты почти вдвое, поскольку отпадает надобность в отдельных расчетах активных и реактивных сопротивлений роторной обмотки, активных и реактивных составляющих установившихся значений операторных сопротивлений машины. По представленным формулам были рассчитаны параметры обмотки ротора для двух усовершенствованных СРД в асинхронном режиме, точнее для  $S=1$ , по уточненной и по упрощенной методикам. Кроме того, параметры этих машин были определены и экспериментально, статическим методом. У первой машины ротор представлял собой конструкцию, на полюсе которого было 5 стержней, а на полюсе ротора второй машины — 6 стержней. У первой машины воздушный зазор  $\delta=0,75$  мм, а у второй  $\delta=0,35$  мм.

Ниже представлена таблица сравнительных значений параметров этих машин, рассчитанных по двум методикам и определенных экспериментально.

Таблица 1  
Продольная ось ( $\delta=0,75$  мм)

Параметры	Уточненный метод	Упрощенный метод	Эксперимент
$R_{exd}(js)$	0,234	0,251	
$I_{mx_d}(js)$	$-j$ 0,0434	$-j$ 0,04	
$x_d''$	0,252	0,249	0,25
$Z_{rd}I_m$	0,385	2,4	1,98
$Z_{rd}R_e$	0,0486	0,0423	0,0365

Поперечная ось

$R_{exq}(js)$	0,1815	0,188	
$I_{mx_q}(js)$	$-j$ 0,0272	$-j$ 0,0305	
$x_d''$	0,1855	0,1835	0,216
$I_m Z_{rq}$	0,401	0,41	0,216
$R_e Z_{rq}$	0,0456	0,0423	0,0487

Таблица 2  
Продольная ось ( $\delta=0,35$  мм)

Параметры	Уточненный метод	Упрощенный метод	Эксперимент
$R_{exd}(js)$	0,253	0,249	
$I_{mx_d}(js)$	$-j$ 0,0535	$-j$ 0,043	
$x_d''$	0,187	0,2663	0,164
$I_m Z_{r(2p)q}$	4,06	4,06	3,55
$R_e Z_{r(2p)q}$	0,0583	0,0469	0,052

Поперечная ось

$R_{exq}(js)$	0,1985	0,191	
$I_{mx_q}(js)$	$-j$ 0,0357	$-j$ 0,027	
$x_d''$	0,162	0,1898	0,1725
$I_m Z_{rq}$	0,75	0,749	0,665
$R_e Z_{rq}$	0,0371	0,0372	0,0582

## Выводы

1. Расчеты, проведенные по уточненной методике, отличаются значительной сложностью, степень которой во многом зависит от конструкции роторного листа железа. Для практического пользования эта методика рекомендована быть не может.

2. Сравнительный анализ расчетов по уточненной и упрощенной методикам с результатами эксперимента позволяет рекомендовать для практических расчетов метод упрощенного представления многоконтурной роторной обмотки двумя эквивалентными.

3. Результаты расчетов установившегося асинхронного режима работы по уточненной методике почти не отличаются от результатов расчета этих же параметров по упрощенной методике.

5. Уточненная методика расчета параметров позволяет рассчитать токи в отдельных стержнях роторной обмотки по осям  $d$  и  $q$ , и тем самым открываются пути для дальнейшего аналитического и экспериментального исследования работы этих машин в переходных режимах, и, в частности, в асинхронном режиме.

## ЛИТЕРАТУРА

1. T. M. Linville. Starting Performance of Salient-pole Synchronous Motors, Trans. AIEE, 1930, v. 49.

2. L. A. Kilgor. Calculation of Synchronous Machine Constants Reactances and Time Constants Affecting Transient Characteristics, Trans, AIEE, 1931, v. 50.

3. A. W. Rankin. The Direct and Quadraturexes Equivalent Circuits of the Synchronous Machine, Trans. AIEE, 1945, v. 64.

4. М. Е. Телат. Новый подход к определению индуктивных сопротивлений синхронной машины, пер. с англ., ГЭИ, 1959.

5. И. И. Талалов. Преобразование цепей при анализе электрических машин, «Электричество», 1961, № 4.

6. А. И. Вагнов. Основы теории переходных процессов синхронной машины, ГЭИ, 1960.

7. Я. Б. Данилевич, В. В. Домбровский, Е. Я. Казовский. Параметры электрических машин переменного тока. Из-во «Наука», 1965.

8. Ч. Конкордия. Синхронные машины. Переходные и установившиеся процессы, пер. с англ., ГЭИ, 1959.

9. М. И. Алябьев. Общая теория судовых электрических машин. Изд-во «Судостроение», Л. 1965.

10. Т. Лайбль. Теория синхронной машины при переходных процессах. ГЭИ, 1957.

11. И. И. Талалов. Определение токов успокоительных обмоток явнополюсных синхронных машин. Сб. научных трудов Ивановского энергетического института, вып. 8, 1958.

12. Е. В. Кононенко, Т. В. Чешева. Пазовое рассеяние ротора усовершенствованных синхронных реактивных двигателей. Наст. сб. трудов «Изв. ТПИ».