

УДК 534.1:621.313.3.322

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

А. П. ЗОБНИН

ДИНАМИКА РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ

(Представлено академиком М. П. Костенко 18 IV 1975)

1. Увеличение скоростей вращения роторов электрических машин, повышение требований, предъявляемых к ним по уровню шума и вибрации, проблема увеличения ресурса подшипниковых узлов связаны с повышением точности расчета и проектирования электрических машин, рассмотрения их как единой электромеханической системы. Перспективным направлением, позволяющим улучшить динамические характеристики как линейных, так и нелинейных роторных систем, является установка роторов на упругие опоры (¹). И в этом случае, и в случае, когда податливостью обладает вал, ротор приобретает некоторую свободу перемещения около положения равновесия, и поэтому становится особо актуальным вопрос об определении точных значений электромагнитных сил, действующих на ротор.

2. Пусть ротор явнополюсной синхронной машины, имеющей p пар полюсов, занимает несимметричное положение по отношению к расточке статора (рис. 1). Рассмотрим случай, когда намагничивающаяся обмотка расположена на роторе. Определим силы притяжения, действующие со стороны поля на ротор.

Обозначим: e_0, ψ_0 — постоянные эксцентриситет ротора и угол, определяющий его, e — суммарный эксцентриситет, $\omega = \text{const}$ — угловая скорость вращения ротора; β — переменная интегрирования, отсчитываемая от продолжения вектора суммарного эксцентриситета; l — длина пакета ротора; R — радиус расточки статора; γ — полюсная дуга; $F = iW$ — намагничивающая сила обмотки одного полюса, одинаковая для всех полюсов; F_0 — скалярный перераспределенный магнитный потенциал пакета статора. δ_0, B_0 — зазор и индукция в зазоре машины при симметричном положении ротора по отношению к статору; δ, B — то же при несимметричном положении ротора по отношению к статору.

Введем следующие системы координат (рис. 1): $x_1 O_1 y_1$ и $x O y$ — неподвижные, с началом соответственно в центре статора O_1 и в точке O ; $\xi_1 O_1 \eta_1$ и $\xi O \eta$ — вращающиеся вместе с ротором системы координат с началом в тех же точках.

Сделаем следующие допущения:

1) магнитным сопротивлением стали и полем вне рабочего зазора машины пренебрегаем;

2) зубчатость статора не учитываем;

3) поле в зазоре машины считаем плоскопараллельным;

4) полюсные наконечники считаем выполненными без скоса.

3. Определение магнитной энергии машины. Полагая $e \ll \delta_0$, получим с точностью до членов второго порядка малости индукцию под k -м полюсом (²)

$$B_k = \frac{\mu_0}{\delta_0} \left[1 + e \cos \beta + \frac{e^2}{2} (1 + \cos 2\beta) \right] [(-1)^{k-1} F - F_0]; \quad (1)$$

в (1) обозначено

$$\varepsilon = e/\delta_0. \quad (2)$$

Суммарный магнитный поток ротора равен нулю:

$$\sum_{h=1}^{h=2p} \Phi_h = 0. \quad (3)$$

Раскрывая (3), найдем

$$F_0|_{p=1} = F \frac{4\delta_0 \sin \gamma/2 (x_1 \cos \omega t + y_1 \sin \omega t)}{\gamma \delta_0^2 (2 + \varepsilon^2) + \sin \gamma [(x_1^2 - y_1^2) \cos 2\omega t + 2x_1 y_1 \sin 2\omega t]}; \quad (4)$$

$$F_0|_{p=2} = F \frac{\sin \gamma [(x_1^2 - y_1^2) \cos 2\omega t + 2x_1 y_1 \sin 2\omega t]}{\gamma \delta_0^2 (2 + \varepsilon^2)}; \quad (5)$$

$$F_0|_{p>2} = 0. \quad (6)$$

Полная магнитная энергия в зазоре машины

$$W_m = \sum_{h=1}^{h=2p} \frac{1}{2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} [(-1)^{h-1} F - F_0] B_h dS. \quad (7)$$

Учитывая выражения (1), (4)–(7), получим в координатах ξ_1, η_1

$$W_m|_{p=1} = \frac{\mu_0 R l F^2}{2\delta_0^2} \left\{ (2\delta_0^2 + \xi_1^2 + \eta_1^2) \gamma + \sin \gamma (\xi_1^2 - \eta_1^2) - \frac{16\xi_1^2 \delta_0^2 \sin^2 \gamma/2}{\gamma (2\delta_0^2 + \xi_1^2 + \eta_1^2) + \sin \gamma (\xi_1^2 - \eta_1^2)} \right\}; \quad (8)$$

$$W_m|_{p>1} = \frac{\mu_0 R l p F^2 \gamma}{2\delta_0^3} (2\delta_0^2 + \xi_1^2 + \eta_1^2). \quad (9)$$

4. Определение электромагнитных сил притяжения, действующих на ротор двухполюсной машины. Согласно (3), найдем

$$F_{\xi_1} = \partial W_m / \partial \xi_1|_{F=\text{const}}, \quad F_{\eta_1} = \partial W_m / \partial \eta_1|_{F=\text{const}}. \quad (10)$$

Ограничиваясь членами первого порядка малости, получим в координатах ξ, η

$$F_{\xi} = c_{\xi} [\xi + e_0 \cos (\omega t - \psi_0)], \quad F_{\eta} = c_{\eta} [\eta - e_0 \sin (\omega t - \psi_0)], \quad (11)$$

$$c_{\xi} = \frac{\mu_0 R l F^2}{\delta_0^3} \left(\gamma + \sin \gamma - \frac{8 \sin^2 \gamma/2}{\gamma} \right), \quad c_{\eta} = \frac{\mu_0 R l F^2}{\delta_0^3} (\gamma - \sin \gamma). \quad (12)$$

Выражения (11) определяют три составляющие силы:

1) позиционную силу, проекции которой на продольную и поперечную оси машины равны соответственно $c_{\xi} \xi$ и $c_{\eta} \eta$, причем для любого полюсного угла γ , согласно (12), справедливо неравенство $c_{\eta} > c_{\xi}$;

2) силу одностороннего магнитного притяжения, направленную в сторону вектора постоянного эксцентриситета e_0 и имеющую величину

$$1/2 e_0 (c_{\eta} + c_{\xi});$$

3) силу, вращающуюся в сторону вращения ротора с угловой скоростью 2ω и имеющую величину $1/2 e_0 (c_{\eta} - c_{\xi})$.

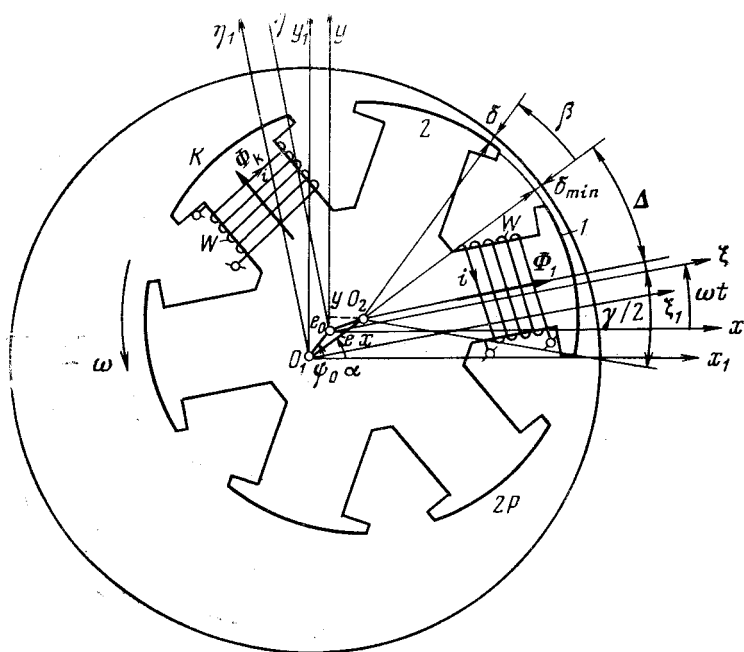


Рис. 1

5. Определение электромагнитных сил, действующих на ротор многополюсной машины. Из (9) и (10) найдем

$$F_{\xi} = c_1 [\xi + e_0 \cos (\omega t - \psi_0)], \quad F_{\eta} = c_1 [\eta - e_0 \sin (\omega t - \psi_0)]; \quad (13)$$

$$c_1 = \mu_0 R l F^2 p \gamma / \delta_0^3. \quad (14)$$

Выражения (13) определяют две составляющие силы:

1) позиционную силу, проекции которой на направления осей ξ и η равны соответственно $c_1 \xi$ и $c_1 \eta$;

2) силу одностороннего магнитного притяжения, имеющую величину $c_1 e_0$.

6. Динамика ротора двухполюсной явнополюсной синхронной машины, установленного на безмассовом податливом валу. Пусть центр инерции C ротора смещен от оси ротора, проходящей через точку O_2 (рис. 2). Проекция этого смещения на вращающиеся оси составляют соответственно ε_1 и ε_2 . Уравнения движения центра O_2 ротора с учетом сил внешнего вязкого сопротивления и электромагнитных сил притяжения, записанные в проекциях на вращающиеся оси ξ, η , имеют вид

$$\ddot{\xi} + 2\delta_*(\dot{\xi} - \omega\eta) - 2\omega\dot{\eta} + (\omega_1^2 - \omega^2)\xi = \varepsilon_1\omega^2 + \frac{c_{\xi}e_0}{m} \cos(\omega t - \psi_0) - g \sin \omega t, \quad (15)$$

$$\ddot{\eta} + 2\delta_*(\dot{\eta} + \omega\xi) + 2\omega\dot{\xi} + (\omega_2^2 - \omega^2)\eta = \varepsilon_2\omega^2 - \frac{c_{\eta}e_0}{m} \sin(\omega t - \psi_0) - g \cos \omega t;$$

$$2\delta_* = k/m, \quad (c - c_{\eta})/m = \omega_1^2, \quad (c - c_{\xi})/m = \omega_2^2,$$

c — жесткость вала, m — масса ротора, k — коэффициент внешнего вязкого сопротивления.

Уравнения (15) описывают три составляющие движения центра ротора:

1) прецессионное движение с угловой скоростью ω , вызванное действием неуравновешенности;

