

ОПТИМАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ СОВМЕЩЕННЫХ БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

В. Т. КАРАВАЕВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме создания бесконтактных электрических машин и разрабатывается их теория. Актуальность этой проблемы подтверждается необходимостью повышения надежности работы электрических машин и энергетических систем в целом.

При проектировании бесконтактных электрических машин большое значение имеет выбор рациональной геометрии пластин пакетов статора и ротора, так как от внутренней геометрии магнитопровода зависят все основные характеристики машины. Неудачный выбор геометрии пластин, например, выполнение машины слишком «железной» или, наоборот, «медной», не может быть исправлен за счет изменения обмоточных данных, поэтому определение геометрии магнитопровода является одним из наиболее ответственных моментов при проектировании.

Особенность данной бесконтактной синхронной машины заключается в том, что как возбудитель, так и генератор, имея один и тот же габарит, значительно различаются по мощности. Возбудитель, имеющий относительно небольшую мощность, может иметь геометрию магнитной цепи, далекую от оптимальной.

В настоящей работе рассматривается возможность получения оптимальной геометрии возбудителя при сохранении оптимальной геометрии бесконтактного синхронного генератора.

Приведем некоторые соотношения для отдельных участков магнитной цепи двух неявнополюсных совмещенных в одном магнитопроводе и обмотках синхронных электрических машин с учетом допустимых суммарных магнитных нагрузок.

Минимальное значение высоты ярма h_{ap} ротора определяется из условия, что магнитный поток, проходящийся на пару полюсов, равен

$$\Phi = \frac{\pi D l}{2p_2} \cdot B_s \cdot \alpha' = 2h_{ap} \cdot B_{ap} \cdot k_c.$$

Отсюда

$$h_{ap} = \frac{\pi D \alpha'}{4p_2 \gamma_{ap} \cdot k_c}, \quad (1)$$

где

D — диаметр ротора;

l — расчетная длина машины;

α' — расчетное полюсное перекрытие;

$\gamma_{ap} = \frac{B_{ap}}{B_{\delta}}$ — отношение индукции в ярме ротора к индукции в воздушном зазоре;

K_c — коэффициент заполнения пакета сталью.

Ввиду того, что величина индукции в ярме ротора B_{ap} ниже, чем индукция в зубце ротора B_{zp} , и мало влияет на величину индуктивного сопротивления, принимаем высоту ярма ротора h_{ap} и величину индукции в ярме ротора B_{ap} постоянной и определяемой суммарной магнитной индукцией.

Минимальное значение ширины зубца b_{zp} определяется при условии, что весь магнитный поток проходит через зубец ротора, и находится из равенства

$$B_{\delta} \frac{\pi D}{z_p} = B_{zp} \cdot b_{zp} \cdot K_c,$$

отсюда

$$b_{zp} = \frac{\pi D}{z_p \cdot \gamma_{zp} \cdot K_c}, \quad (2)$$

где

z_p — число пазов ротора,

$\gamma_{zp} = \frac{B_{zp}}{B_{\delta}}$ — отношение максимальной индукции в зубце ротора к индукции воздушного зазора.

В расчете принимаем, что $K_c = 1$.

Для оценки зависимости безразмерных параметров машины от геометрии магнитопровода найдем приближенную зависимость площади паза ротора от габаритных размеров машины. Площадь пазов ротора с учетом (1) и (2)

$$S_{пр} = b_{пр} \cdot h_{пр} \cdot z_p = \frac{\pi D^2}{2} k_D^2 \left(1 - \frac{1}{\gamma_{zp}} \right) \left(1 - \frac{\lambda_c}{k_D} - \frac{\pi \alpha'}{2 p_2 \gamma_{ap}} \right), \quad (3)$$

где ширина паза ротора определяется по формуле

$$b_{пр} = \frac{\pi D}{z_p} \left(1 - \frac{1}{\gamma_{zp}} \right); \quad (4)$$

высота паза ротора

$$h_{пр} = \frac{D - D_0 - 2h_{ap}}{2};$$

$k_D = \frac{D}{D_H}$ — отношение диаметра расточки ротора к наружному диаметру;

$\lambda_c = \frac{D_0}{D_H}$ — отношение внутреннего диаметра ярма к внешнему диаметру.

С другой стороны, площадь паза ротора можно определить по формуле

$$S_{пр} \cdot K_{зп} = 2m_1 \cdot w_1 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot q_{пр}, \quad (5)$$

где

$K_{зп}$ — коэффициент заполнения паза ротора;

m_1 — число фаз обмотки якоря возбуждителя;

w_1 — число витков в фазе возбуждителя;

$q_{пр}$ — сечение проводника обмотки ротора;

$I_{\Sigma \text{пр}}$ — суммарный ток в проводнике обмотки ротора;
 $j_{\text{пр}}$ — суммарная плотность в проводнике обмотки ротора;
 a_1 — число параллельных ветвей якорной обмотки возбуждителя одной параллельной ветви с равношаговыми секциями обмотки ротора;
 a_2 — число параллельных ветвей с равношаговыми секциями обмотки ротора;

$$\text{отсюда} \quad S_{\text{пр}} = \frac{2m_1 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot I_{\Sigma \text{пр}} \cdot W_1}{k_{3\text{п}} \cdot j_{\text{пр}}} \quad (6)$$

Значение суммарного тока $I_{\Sigma \text{пр}}$ в проводнике определяем из соотношений намагничивающих сил бесконтактного синхронного генератора

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 \left(k_{\mu 1} \frac{k_{\delta} \delta}{\mu_0} B_1 + 0,45 \frac{A_1 D}{p_1} k_{01} \cdot k_{a1} \right) &= \frac{m \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot W_1 \cdot k_{01}}{p_1} I_{\text{пр}} \\ \beta_2 \left(k_{\mu 2} \frac{k_{\delta} \delta}{\mu_0} B_2 + 0,45 \frac{A_2 D}{p_2} k_{02} \cdot k_{a2} \right) &= a_2 \cdot W_{\text{вг}} \cdot k_{0\text{вг}} \cdot k_{\text{н}} \cdot I_{\text{вг-пр}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Произведя простые преобразования соотношения (7) и учитывая, что

$W_{\text{вг}}$ — число витков обмотки возбуждения генератора в одной параллельной ветви с равношаговыми секциями на один полюс, определяемое схемой обмотки;
 p_1 — число пар полюсов возбуждителя;
 β_1 и β_2 — коэффициенты, учитывающие векторное сложение основной н. с. и реакции якоря для возбуждителя и генератора;
 A_1 и A_2 — линейные нагрузки возбуждителя и генератора;
 B_1 и B_2 — магнитные индукции возбуждителя и генератора в воздушном зазоре;
 $A = \frac{2m_1 a_1 a_2 W_1 I_{\Sigma \text{пр}}}{\pi D}$ — соотношение суммарной линейной нагрузки и суммарного тока в проводнике обмотки ротора;
 $B_{\Sigma \text{пр}}$ — суммарная магнитная индукция в зубце ротора;
 $B = B_1 + B_2$ — суммарная магнитная индукция в воздушном зазоре;
 k_{01} , k_{02} и $k_{0\text{вг}}$ — коэффициенты обмотки якоря возбуждителя, генератора и обмотки возбуждения генератора;

$\xi_1 = \frac{A_1}{A}$, $\xi_2 = \frac{A_2}{A}$, $b_1 = \frac{B_1}{B}$, $b_2 = \frac{B_2}{B}$ — величины, характеризующие относительное распределение линейных и магнитных нагрузок бесконтактного генератора 2;

$k_{\text{н}}$ — коэффициент неравномерности тока в обмотке возбуждения генератора;

k_{a1} , k_{a2} — коэффициенты приведения реакции якоря возбуждителя и генератора;

k_{δ} , δ — коэффициент воздушного зазора и воздушный зазор машины;

$k_{\mu 1}$, $k_{\mu 2}$ — коэффициент насыщения возбуждителя и генератора;

$I_{\text{пр}} = 0,33 \cdot k_{\text{н}} I_{\text{вг-пр}}$ — соотношение переменного и постоянного тока в проводнике обмотки ротора;

$I_{\text{пр}} = \frac{I_{\Sigma \text{пр}}}{3,19}$ — соотношение переменного и суммарного тока в проводнике обмотки ротора,

получим

$$I_{\text{пр}} = \frac{k}{\gamma_{\text{zp}}}, \quad k_{\text{н}} \cdot I_{\text{вгпр}} = \frac{k_1}{\gamma_{\text{zp}}},$$

$$I_{\Sigma \text{пр}} = \frac{1}{\gamma_{\text{zp}}} \sqrt{k^2 + k_1^2}, \quad (8)$$

где

$$k = \frac{2\beta_1 \cdot k_{\mu 1} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot b_1 \cdot B_{\text{zp}} \cdot \rho_1}{\mu_0 \cdot m_1 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot W_1 \cdot k_{01} \cdot (0,9 - 5,68\beta_1 \cdot \xi_1 \cdot k_{a2})},$$

$$k_1 = \frac{\beta_2 \cdot k_{\mu 2} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot b_2 \cdot B_{\text{zp}} \cdot \rho_2}{a_2 \cdot \rho_2 \cdot W_{\text{вг}} \cdot k_{0\text{вг}} - 0,475\beta_2 \cdot k_{02} \cdot \xi_2 \cdot m_1 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot W_1 \cdot k_{a2}}.$$

коэффициенты, зависящие от электромагнитных нагрузок бесконтактного генератора.

Подставляя значение суммарного тока (8) в проводнике обмотки ротора в формулу (6), получим зависимость площади пазов ротора $S_{\text{пр}}$ от электромагнитных нагрузок совмещенных электрических машин:

$$S_{\text{пр}} = \frac{k_2}{\gamma_{\text{zp}}} \sqrt{k^2 + k_1^2}, \quad (9)$$

где

$$k_2 = \frac{2m_1 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot W_1}{k_{3\text{п}} \cdot j_{\text{пр}}}.$$

Решая уравнение (3) и (9) относительно λ_c , получим:

$$\lambda_c = k_D \cdot \left(1 - \frac{\pi \alpha'}{2\rho_2 \gamma_{\text{zp}}} \right) - \frac{2k_2 \sqrt{k^2 + k_1^2}}{\pi D_{\text{н}}^2 k_D (\gamma_{\text{zp}} - 1)}. \quad (10)$$

Уравнение (10) $\lambda_c = f_1(\gamma_{\text{zp}})$ для различных значений коэффициента k_D и постоянном значении коэффициентов k , k_1 и k_2 показаны кривыми 1, 2, 3, на рис. 1.

Оптимальный режим работы возбудителя возможен при минимальном полном сопротивлении обмотки якоря возбудителя, т. е. при оптимальной геометрии листа ротора и при равенстве сопротивления обмотки возбуждения генератора критическому сопротивлению обмотки якоря возбудителя.

Полное сопротивление обмотки якоря возбудителя равно:

$$z = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} = \sqrt{\frac{N_1}{S_{\text{пр}}} - N_2 \left[\frac{S_{\text{пр}} - h_2 \cdot b_{\text{пр}} \cdot z_{\text{р}}}{9z_{\text{р}} l_{\text{пр}}^2} + \frac{h_2}{b_{\text{пр}}} + \Sigma \lambda \right]}. \quad (11)$$

где

r_1 — активное сопротивление обмотки якоря возбудителя;

x_1 — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря возбудителя;

$\Sigma \lambda$ — удельная магнитная проводимость, независимая от геометрии паза ротора;

h_2 — высота клина паза ротора и толщина пазовой изоляции;

$$N_1 = \frac{16m_1^2 \cdot \rho_1^2 l^2 \left(1 + \frac{l_1}{l} \right)^2 W_1^4}{k_{3\text{п}}^2};$$

ρ — удельное сопротивление обмотки;

l_1 — длина лобовой части обмотки ротора;

$$N_2 = 16\pi^2 \mu_0^2 f_1^2 l^2 \frac{W_1^4}{p_1^2 q_1^2};$$

μ_0 — магнитная проницаемость вакуума;

f_1 — выходная частота возбuditеля;

q_1 — число пазов на полюс и фазу возбuditеля.

Произведя простые преобразования уравнения (1), с учетом уравнений (3) и (4), получим:

$$z_1 = \sqrt{\frac{N_1}{\left[\frac{\pi D_H^2}{2} k_D \left(1 - \frac{1}{\gamma_{zp}} \right) (0,48 k_D - \lambda_c) \right]^2} + N_2 \left\{ \frac{[0,5 D_H \cdot (0,48 k_D - \lambda_c) + 8,63] z_p + \Sigma \lambda}{9 \pi D_H \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma_{zp}} \right)} \right\}^2} \quad (12)$$

Уравнение (12) исследовалось на электронной цифровой вычислительной машине «Проминь-М» на минимум полного сопротивления обмотки якоря возбuditеля z_1 в функции величины λ_c при различных значениях γ_{zp} , k_D и z_p для выполненной машины с данными: $D_H=24,5$ см, $D=15$ см, $D_0=4,8$ см, $\delta=0,04$ см, $k_\delta=1,585$, $\alpha'=0,72$, $p_1=6$, $z_p=54$, $p_2=3$, $m_1=3$, $W=90$, $W_1=54$, $k_{01}=0,83$, $k_{02}=0,682$, $k_{авт}=0,735$, $q_{п.р.}=0,00152$ см, $a_1=6$, $a_2=4$, $a_3=9$, $\beta_1=0,75$, $k_{a1}=0,8$, $k_{a2}=0,8$, $k_H=0,4$, $B_{zp}=16,200$ гс, $\beta_2=0,75$, $k_{\mu_1}=1,49$, $k_{\mu_2}=1,2$, $\xi=0,316$, $b_1=0,15$. Из данного исследования была получена зависимость

$$\lambda_c = f_2(\gamma_{zp}),$$

представленная на рис. 1 кривыми 4, 5, 6, точки пересечения которых с кривыми 1, 2, 3 определяют оптимальные значения коэффициента γ_{zp} , позволяющие определить оптимальную величину λ_c и пазовую геометрию

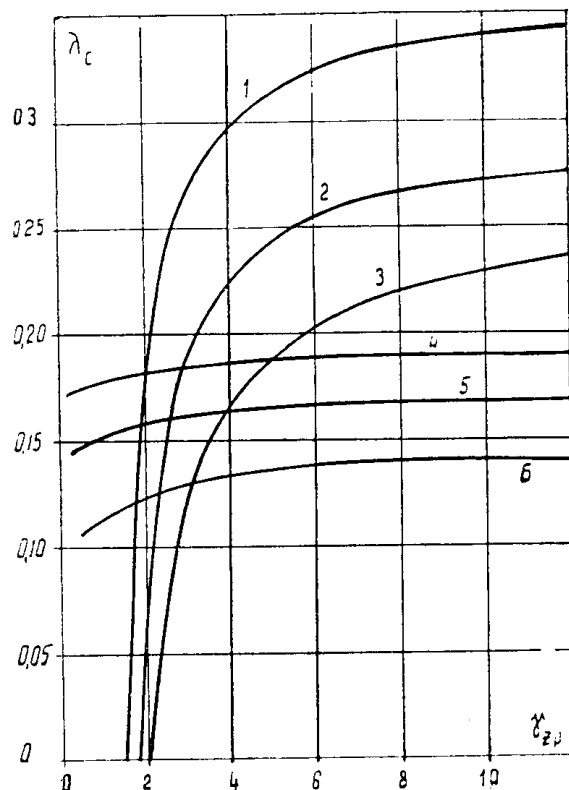


Рис. 1

по формулам (2), (3) и (4). Анализ рис. 1 показывает, что с уменьшением числа пазов ротора z_p и увеличением k_D , а следовательно, и λ_c , т. е. увеличением полюсности совмещенных электрических машин, уменьшается оптимальное значение коэффициента γ_{zp} , а следовательно, соответственно будут уменьшаться основные намагничивающие силы возбuditеля и генератора.

Согласование сопротивления нагрузки возбuditеля (сопротивления обмотки возбуждения генератора) с критическим сопротивлением обмотки якоря возбuditеля возможно как с помощью увеличения числа параллельных ветвей с равношаговыми секциями совмещенной обмотки ротора 1, так и посредством некоторого увеличения λ_c при оптимальном значении γ_{zp} , так как при этом уменьшается индуктивное сопротивление, в то время как активное сопротивление увеличивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Т. Караваев. Бесконтактная синхронная машина. Авторское свидетельство СССР, № 264521, 1970.
2. В. Т. Караваев. Главные размеры и оптимальные электромагнитные нагрузки бесконтактного синхронного генератора с совмещенными магнитными и электрическими цепями. Труды Горьковского политехнического института, т. 25, выпуск 15, 1969.