ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. С. М. КИРОВА

Том 229

1972

К РАСЧЕТУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПАЗОВОГО РАССЕЯНИЯ УДАРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

В. З. ХОРЬКОВА

(Представлена научным семинаром кафедры электрических машин и отделом электрических машин НИИ АЭМ)

С целью уменьшения индуктивного сопротивления пазовой части обмотки статора в ударных генераторах стремятся высоту пазов статора выполнить по возможности меньшей. Высота пазов статора генераторов разрывной мощности в 2—2,5 раза меньше высоты статорных пазов турбогенераторов. Еще меньше высота пазов статора генераторов ударной мощности. Соотношение между высотой и шириной статорного паза в ударных генераторах Капицы-Костенко и завода «Электросила» (TO-12-2) равно приблизительно двум [1, 2]. Такое соотношение высоты паза к ширине имеют и зарубежные ударные генераторы [4]. В настоящее время наблюдается тенденция к еще большему снижению пазов. Соотношение между высотой и шириной паза в опытном ударном генераторе фирмы СЕМ (Франция) равно 0,5 [3].

Дальнейшее уменьшение индуктивного сопротивления пазовой части обмотки статора многие авторы связывают с частичным или полным вынесением обмотки статора в воздушный зазор [5, 6]. Одним из возможных конструктивных исполнений генераторов с частичным вынесением обмотки статора в воздушный зазор является явнополюсное исполнение статора с неглубоким межполюсным пространством. Такое межполюсное пространство может быть представлено как паз, высота которого значительно меньше ширины. Известно, что в межполюсном пространстве наряду с потоком рассеяния между полюсами имеет место поток рассеяния к ярму. Очевидно, что с резким уменьшением высоты пазов статора ударных генераторов поток через дно паза будет играть определенную роль, и представляет интерес оценить его долю в общем потоке пазового рассеяния. Рассмотрим поля рассеяния в межполюсном пространстве явнополюсного статора ударного генератора, в котором уложена однофазная концентрическая обмотка. Рассматриваем межполюсное пространство как паз, лежащий в плоскости осей x, y, рис. 1.

Ввиду того, что длина активной части машины велика по сравнению с размерами паза, магнитное поле можно считать плоскопараллельным. Пространство паза целесообразно разделить на три области, обозначенные цифрами I, II, III, рис. 1. Области I и III свободны от тока, векторные потенциалы этих полей удовлетворяют уравнению Лапласа:

$$\nabla^2 A = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0.$$
(1)

В области II имеются два токонесущих стержня, и векторный потенциал этой области удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\nabla^2 A = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu\delta, \tag{2}$$

где б плотность тока в рассматриваемой точке. Распределение плотности тока в пространстве можно выразить в виде ряда Фурье:

XA

$$\delta = a_0 + \sum_n a_n \cos n\kappa y, \qquad (3)$$



Рис. 1. Паз статора

где

$$a_{0} = 2\delta_{0} \frac{\theta}{\theta_{n}};$$

$$\delta_{0} = \frac{i}{a \cdot \theta};$$

$$\kappa = \frac{2\pi}{a\theta};$$

$$a_{n} = \frac{2\delta}{\pi n} \{\sin n\kappa \theta_{1} + (-1)^{n} \sin [n\kappa (\theta_{3} - \theta_{2})]\},$$

n — любое целое число i — ток стержня.

Очевидно, что векторный потенциал является периодической функцией от у, с тем же периодом, что и δ. Общие выражения векторного потенциала по областям имеют вид:

$$A_{\rm I} = \sum_{n} B_n \left(e^{n\kappa x} + e^{-n\kappa x} \right) \cos n\kappa y; \tag{4}$$

$$A_{\rm II} = -2\pi a_{\rm o} (x - s_{\rm I})^2 + \sum_{n} \left(D_n e^{n\kappa x} + E_n e^{-n\kappa x} + \frac{4\pi a_n}{n^2 \kappa^2} \right) \cos n\kappa y; \quad (5)$$

$$A_{\rm III} = -2\pi a_0 (s_2 - s_1) \left[2x - (s_1 - s_2) \right] + \sum_n (G_n e^{n\kappa x} + F_n e^{-n\kappa x}) \cos n\kappa y.$$
(6)

25

Для определения неизвестных коэффициентов B_n , D_n , E_n , G_n , F_n исходим из условия, что на границах между областями II и III тангенциальные составляющие напряженности поля и нормальные составляющие магнитной индукции непрерывны и на поверхности S_3 , проходящей на уровне высоты паза, нормальная составляющая индукции равна нулю. Получаем пять уравнений, из которых нетрудно найти искомые коэффициенты

$$\begin{split} B_{n} &= \frac{2\pi a_{n}}{n^{2}\kappa^{2}} \cdot \frac{\left(e^{-n\kappa s_{1}} - e^{-n\kappa s_{2}}\right)e^{n\kappa s_{3}} + \left(e^{n\kappa s_{1}} - e^{n\kappa s_{3}}\right)e^{-n\kappa s_{3}}}{e^{n\kappa s_{3}} + e^{-n\kappa s_{3}}};\\ D_{n} &= \frac{2\pi a_{n}}{n^{2}\kappa^{2}} \cdot \frac{-e^{-n\kappa s_{2}}e^{n\kappa s_{3}} + \left(e^{n\kappa s_{1}} - e^{-n\kappa s_{1}} - e^{n\kappa s_{2}}\right)e^{-n\kappa s_{3}}}{e^{n\kappa s_{3}} + e^{-n\kappa s_{3}}};\\ E_{n} &= -\frac{2\pi a_{n}}{n^{2}\kappa^{2}} \cdot \frac{\left(e^{n\kappa s_{1}} - e^{-n\kappa s_{1}} + e^{-n\kappa s_{2}}\right)e^{n\kappa s_{3}} + e^{n\kappa s_{3}}}{e^{n\kappa s_{3}} + e^{-n\kappa s_{3}}};\\ G_{n} &= \frac{2\pi a_{n}}{n^{2}\kappa^{2}} \cdot \frac{\left[\left(e^{n\kappa s_{1}} - e^{-n\kappa s_{1}}\right) - \left(e^{n\kappa s_{2}} - e^{-n\kappa s_{2}}\right)\right]e^{-n\kappa s_{3}}}{e^{n\kappa s_{3}} + e^{-n\kappa s_{3}}};\\ F_{n} &= \frac{2\pi a_{n}}{n^{2}\kappa^{2}} \cdot \frac{\left[\left(e^{n\kappa s_{1}} - e^{-n\kappa s_{1}}\right) - \left(e^{n\kappa s_{2}} - e^{-n\kappa s_{3}}\right)\right]e^{n\kappa s_{3}}}{e^{n\kappa s_{3}} + e^{-n\kappa s_{3}}}.\end{split}$$

Опуская промежуточные преобразования, можно записать выражения для векторного потенциала по областям в окончательном виде:

$$A^{I} = \sum_{n} \frac{2\pi a_{n}}{n^{2} \kappa^{2}} (e^{-n\kappa s_{1}} - e^{-n\kappa s_{2}}) (e^{n\kappa x} + e^{-n\kappa x}) \cos n\kappa y;$$
(7)

$$A_{II} = -2\pi a_{0} (x - s_{1})^{2} - \sum_{n} \frac{2\pi a_{n}}{n^{2} \kappa^{2}} [e^{-n\kappa s_{2}} e^{n\kappa x} + (e^{n\kappa s_{1}} - e^{-n\kappa s_{1}} + e^{-n\kappa s_{2}}) e^{-n\kappa x} - 2] \cdot \cos n\kappa y;$$
(8)

$$A_{III} = -2\pi a_{0} (s_{2} - s_{1}) [2x - (s_{1} + s_{2})] + \sum_{n} \frac{2\pi a_{n}}{n^{2} \kappa^{2}} \times (e^{n\kappa s_{1}} - e^{-n\kappa s_{1}}) - (e^{n\kappa s_{2}} - e^{-n\kappa s_{2}}) [e^{-2n\kappa s_{3}} e^{n\kappa x} - e^{-n\kappa x}] \cos n\kappa y.$$
(9)

Определим распределение индукции по дну паза и по высоте паза вдоль поверхности железа. Нормальная составляющая индукции к дну паза (в сечении x = 0) равна:

$$B_{xI} = -\frac{\partial A_I}{\partial y} = \mu_0 \frac{2i}{s_{\pi}} \cdot \frac{s_{\pi}^2}{4\pi^2 \alpha s} \sum_n \frac{\sin n\kappa s_1 + (-1)^n \sin [n\kappa (s_3 - s_2)]}{n^2} \times (e^{-n\kappa s_1} - e^{-n\kappa s_2}) \sin n\kappa y.$$
(10)

Кривая распределения индукции по ширине паза для одного из рассмотренных вариантов

$$(h_{\Pi} = \frac{1}{2} \theta_{\Pi}; \quad \theta_1 = \theta_3 - \theta_2; \quad \Delta_{H3} = 0, 1 \theta_{\Pi}; \quad S_1 = S_3 - S_2 = \Delta_{H3})$$

представлена на рис. 2.

Расчеты показывают, что максимальное значение индукции B_x зависит от соотношения между высотой и шириной паза и от толщины изоляции стержня.

Из рис. 2 очевидно, что для определения потока рассеяния через дно паза нельзя принимать пределы интегрирования

$$y=0\div\frac{\theta_{\pi}}{2},$$

26

как это сделано в [7], и, следовательно, заключение, что при равенстве расстояний между катушкой и средней линией двух соседних полюсов, с одной стороны, и поверхностью полюса, с другой стороны, поток рас-



Рис. 2. Распределение индукции вдоль дна паза, $h_{\Pi} = 0.5 b_{\Pi}$

сеяния (через ярмо) равен нулю независимо от длины катушки, — принципиально неверно. На рис. З представлены значения $B_{\rm xmax}$ в долях максимального значения индукции по высоте паза для различных $\Delta_{\rm H3}$ и



A

 κ_{1} . Для пазов с $\kappa = \frac{h_{\pi}}{b_{\pi}} > 1$ поток рассеяния через дно паза действительно пренебрежительно мал, однако при к≪1 он резко возрастает. При

27

 $\kappa = 0,5$ поток рассеяния через дно паза (при $\Delta_{\mu_3} = 0,1b_{\mu}$) равен 7,5%, а при $\kappa = 0,3-18\%$ от потока рассеяния поперек паза.

Нормальная составляющая индукции к стенкам паза (в сечении

$$= \frac{\theta_{\Pi}}{2}) \text{ равна по областям:}$$

1-я область $0 \le x \le s_1$
 $B_{yI} = -\frac{\partial A_I}{\partial x} = \mu_0 \frac{2i}{\theta_{\Pi}} \cdot \frac{\theta_{\Pi}^2}{4\pi^2 \alpha \beta} \sum_n \frac{\sin n\kappa \theta_1 + (-1)^n \sin [n\kappa (\theta_3 - \theta_2)]}{n^2} \times (e^{-n\kappa s_1} - e^{-n\kappa s_2}) \sin n\kappa x;$ (11)

2-я область $s_1 \leqslant x \leqslant s_2$

y

$$B_{\rm yII} = \mu_0 \frac{2i}{\beta_{\rm fI}} \left\{ \frac{x - s_1}{a} + \frac{\beta_{\rm fI}^2}{4\pi^2 a \beta} \sum_n \frac{\sin n \kappa \beta_1 + (-1)^n \sin \left[n \kappa \left(\beta_3 - \beta_2 \right] \right]}{n^2} \right\}$$

$$\times \left[e^{-n\kappa x} \cdot \operatorname{sh} n\kappa s_1 - e^{-n\kappa s_2} \operatorname{sh} n\kappa x \right] \right\}; \tag{12}$$

3-я область $s_2 \leqslant x \leqslant s_3$

$$B_{\text{yIII}} = \mu_0 \frac{2i}{\theta_{\pi}} \left\{ 1 - \frac{\theta_{\pi}^2}{2\pi^2 a \theta} \sum_n \frac{\sin \kappa \theta_1 + (-1)^n \sin \left[n \kappa \left(\theta_3 - \theta_2 \right) \right]}{n^2} \times \left(\sinh n \kappa s_1 - \sinh n \kappa s_2 \right) \left(e^{-2n \kappa s_3} e^{n \kappa x} + e^{-n \kappa x} \right) \right\}.$$
(13)

Кривая распределения индукции по высоте паза для варианта $\left(h_{\Pi}=\frac{1}{2}\,s_{\Pi}; \quad \Delta_{_{\rm H3}}=0,1s_{\Pi}\right)$ представлена на рис. 4.

Ход кривой и значения индукции в плоскостях S₁, S₂, S₃ несколько отличаются от значений, которые имели бы место при расчете мето-



Рис. 4. Распределение индукции по высоте паза: $h_{\pi} = 0,5 \ b_{\pi}$

дом полных токов (пунктирная кривая). Значения индукции, рассчитанные в различных сечениях паза, для пазов различной геометрии приведены в табл. 1.

Расчеты показывают, что отклонения значения индукции от единицы возрастают с уменьшением высоты паза и увеличением толщины изоляции. Однако при $h_{\pi} \ge 0,5 \, s_{\pi}$, а также при расчетах в первом приближении этими отклонениями можно пренебречь.

В большинстве случаев можно пренебречь также потоком через дно паза — относктельная величина максимального значения индукции B_x при $h_n \ge 0.5 s_n$ не превышает 5%. При $h_n \le 0.5 s_n$ пренебрежение потоком рассеяния через дно паза вносит существенные погрешности. Для подтверждения теоретических положений о наличии потоков рассеяния 28

через дно паза был проведен следующий эксперимент. На дно и стенки паза, размерами $\frac{h_{\pi}}{g_{\pi}} = \frac{8}{78}$ были уложены измерительные рамки:

№ 1 по высоте паза, шириной h_п, № 2 по ширине паза, шириной b,

No 3 —,,—
$$\frac{1}{2} \beta_{\Pi}$$
,
No 4 —,,— $\frac{1}{4} \beta_{\Pi}$.

Э. д. с., наведенная потоком рассеяния в рамках, соответственно равна 115 мв, 7,5 мв, 9,6 мв, 22 мв.

Таблица 1

Nº	$\frac{\Delta_{\rm H3}}{b_{\rm II}}$	$\frac{h_{\pi}}{b_{\pi}}$	B _{yI}	B _{yII}	B _{yIII}	B _x
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	$\begin{array}{c} 0,05\\ 0,05\\ 0,05\\ 0,05\\ 0,05\\ 0,1\\ 0,1\\ 0,1\\ 0,1\\ 0,1\\ 0,1\\ 0,1\\ \end{array}$	5 2 1 0,5 0,2 5 2 1 0,5 0,3	$\begin{array}{c} 0,0013\\ 0,0034\\ 0,0073\\ 0,0165\\ 0,048\\ 0,0036\\ 0,0095\\ 0,023\\ 0,062\\ 0,180\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 1, 0 \\ 0, 998 \\ 0, 990 \\ 0, 977 \\ 0, 951 \\ 0, 999 \\ 0, 989 \\ 0, 975 \\ 0, 945 \\ 0, 850 \end{array}$	1,004 1,010 1,022 1,049 1,157 1,005 1,012 1,023 1,073 1,160	$\begin{array}{c} 0,0012\\ 0,0028\\ 0,0064\\ 0,0145\\ 0,0415\\ 0,0023\\ 0,0062\\ 0,0140\\ 0,0364\\ 0,0530\end{array}$

Значения индукции в различных сечениях паза

Примечание: За единицу принято значение индукции в сечении S2, рассчитанное методом полных токов: $B_{yII} = \mu_0 \frac{2i}{b_r}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. П. Костенко. Электрические машины. Специальная часть, ГЭИ, 1949. 2. Е. Г. Комар. Ударные генераторы завода «Электросила», ВЭП, 1940, № 1. 3. Иохан, П. Ребут, А. Топосиан. Первые эксперименты на синхронных

импульсных генераторах. Доклады 5-го симпозиума по термоядерному синтезу, 1968. 4. Tittel J. Der neue 4300 mva Stoßeistungsgenerator für das schaltwerk der s-s, Siemens — Z, 1962, 36, № 8.

5. Morgan John, William Harold, Wilking John Thomas «Jmprovements in and relating to dynamo-electric machines. The English Elektric Co Ltd (англ. патент) кл. 35, № 881468.

6. Ю. А. Бобков, А. А. Чистяков. Способы снижения сверхпереходной индуктивности ударного генератора. Исследование электромагнитных параметров и потерь в мощных электрических машинах. «Наука», М.-Л., 1966.

7. Б. Хег. Электромагнитные расчеты. Энергоиздат, 1934. 8. М. Штафль. Электродинамические задачи в электрических машинах. «Энергия», 1966.

9. И. М. Постников. Проектирование электрических машин. ГИТЛ, УССР, Киев, 1960.