

**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» (ТО-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 явнополусное 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 ядру. 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 явнополусного 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:

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

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

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

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

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

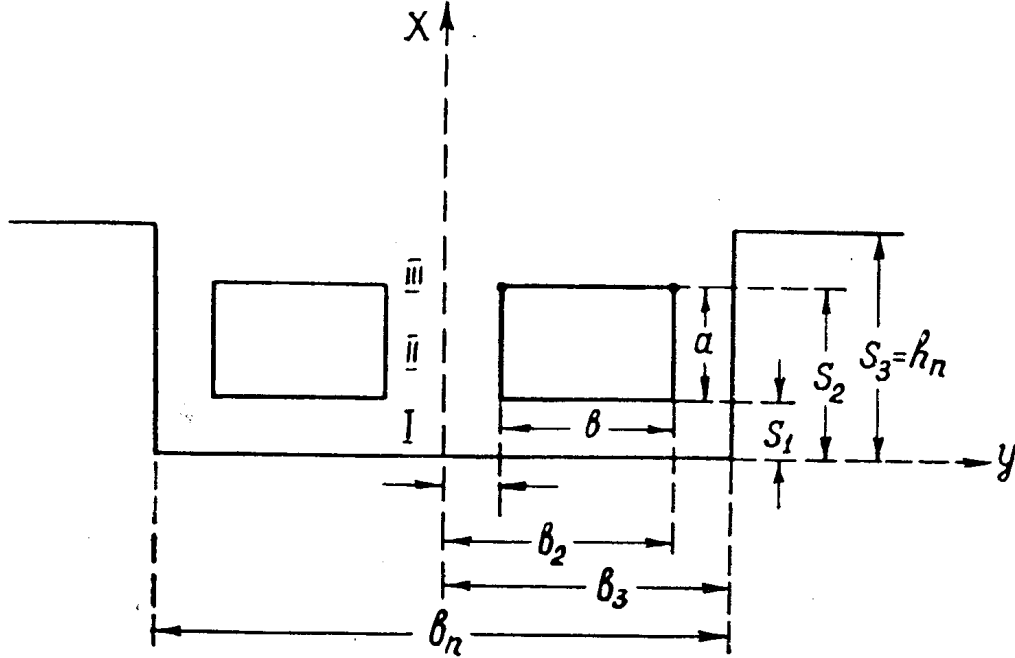


Рис. 1. Паз статора

где

$$a_0 = 2\delta_0 \frac{b}{b_n};$$

$$\delta_0 = \frac{i}{a \cdot b};$$

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

$$a_n = \frac{2\delta}{\pi n} \{ \sin n\kappa b_1 + (-1)^n \sin [n\kappa (b_3 - b_2)] \},$$

n — любое целое число

i — ток стержня.

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

$$A_I = \sum_n B_n (e^{n\kappa x} + e^{-n\kappa x}) \cos n\kappa y; \quad (4)$$

$$A_{II} = -2\pi a_0 (x - s_1)^2 + \sum_n \left(D_n e^{n\kappa x} + E_n e^{-n\kappa x} + \frac{4\pi a_n}{n^2 \kappa^2} \right) \cos n\kappa y; \quad (5)$$

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

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

$$\begin{aligned} B_n &= \frac{2\pi a_n}{n^2 \kappa^2} \cdot \frac{(e^{-n\kappa s_1} - e^{-n\kappa s_2}) e^{n\kappa s_3} + (e^{n\kappa s_1} - e^{n\kappa s_2}) e^{-n\kappa s_3}}{e^{n\kappa s_3} + e^{-n\kappa s_3}}; \\ D_n &= \frac{2\pi a_n}{n^2 \kappa^2} \cdot \frac{e^{-n\kappa s_2} e^{n\kappa s_3} + (e^{n\kappa s_1} - e^{-n\kappa s_1} - e^{n\kappa s_2}) e^{-n\kappa s_3}}{e^{n\kappa s_3} + e^{-n\kappa s_3}}; \\ E_n &= -\frac{2\pi a_n}{n^2 \kappa^2} \cdot \frac{(e^{n\kappa s_1} - e^{-n\kappa s_1} + e^{-n\kappa s_2}) e^{n\kappa s_3} + e^{n\kappa s_2} e^{-n\kappa s_3}}{e^{n\kappa s_3} + e^{-n\kappa s_3}}; \\ G_n &= \frac{2\pi a_n}{n^2 \kappa^2} \cdot \frac{[(e^{n\kappa s_1} - e^{-n\kappa s_1}) - (e^{n\kappa s_2} - e^{-n\kappa s_2})] e^{-n\kappa s_3}}{e^{n\kappa s_3} + e^{-n\kappa s_3}}; \\ F_n &= \frac{2\pi a_n}{n^2 \kappa^2} \cdot \frac{[(e^{n\kappa s_1} - e^{-n\kappa s_1}) - (e^{n\kappa s_2} - e^{-n\kappa s_2})] e^{n\kappa s_3}}{e^{n\kappa s_3} + e^{-n\kappa s_3}}. \end{aligned}$$

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

$$A^I = \sum_n \frac{2\pi a_n}{n^2 \kappa^2} (e^{-n\kappa s_1} - e^{-n\kappa s_2}) (e^{n\kappa x} + e^{-n\kappa x}) \cos n\kappa y; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} A_{II} &= -2\pi a_0 (x - s_1)^2 - \sum_n \frac{2\pi a_n}{n^2 \kappa^2} [e^{-n\kappa s_2} e^{n\kappa x} + (e^{n\kappa s_1} - \\ &\quad - e^{-n\kappa s_1} + e^{-n\kappa s_2}) e^{-n\kappa x} - 2] \cdot \cos n\kappa y; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} A_{III} &= -2\pi a_0 (s_2 - s_1) [2x - (s_1 + s_2)] + \sum_n \frac{2\pi a_n}{n^2 \kappa^2} \times \\ &\quad \times [(e^{n\kappa s_1} - e^{-n\kappa s_1}) - (e^{n\kappa s_2} - e^{-n\kappa s_2})] [e^{-2n\kappa s_3} e^{n\kappa x} - e^{-n\kappa x}] \cos n\kappa y. \end{aligned} \quad (9)$$

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

$$\begin{aligned} B_{xI} &= -\frac{\partial A_I}{\partial y} = \mu_0 \frac{2i}{\theta_n} \cdot \frac{\theta_n^2}{4\pi^2 a \theta} \sum_n \frac{\sin n\kappa \theta_1 + (-1)^n \sin [n\kappa (\theta_3 - \theta_2)]}{n^2} \times \\ &\quad \times (e^{-n\kappa s_1} - e^{-n\kappa s_2}) \sin n\kappa y. \end{aligned} \quad (10)$$

Кривая распределения индукции по ширине паза для одного из рассмотренных вариантов

$$(h_n = \frac{1}{2} \theta_n; \quad \theta_1 = \theta_3 - \theta_2; \quad \Delta_{пз} = 0,1 \theta_n; \quad s_1 = s_3 - s_2 = \Delta_{из})$$

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

$$y = 0 \div \frac{\theta_n}{2},$$

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-

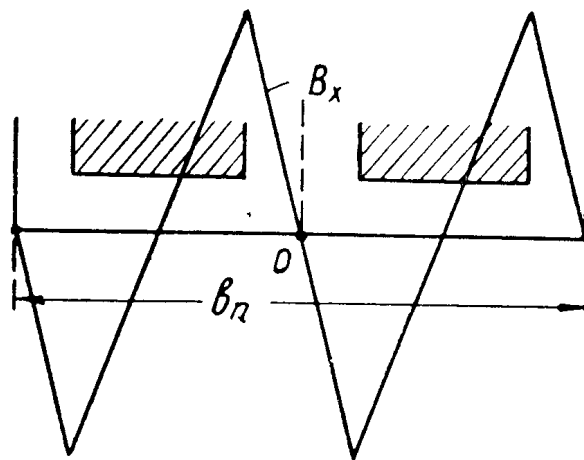


Рис. 2. Распределение индукции вдоль дна паза,
 $h_n = 0,5 b_n$

сеяния (через ярмо) равен нулю независимо от длины катушки, — принципиально неверно. На рис. 3 представлены значения $B_{x\max}$ в долях максимального значения индукции по высоте паза для различных $\Delta_{из}$ и

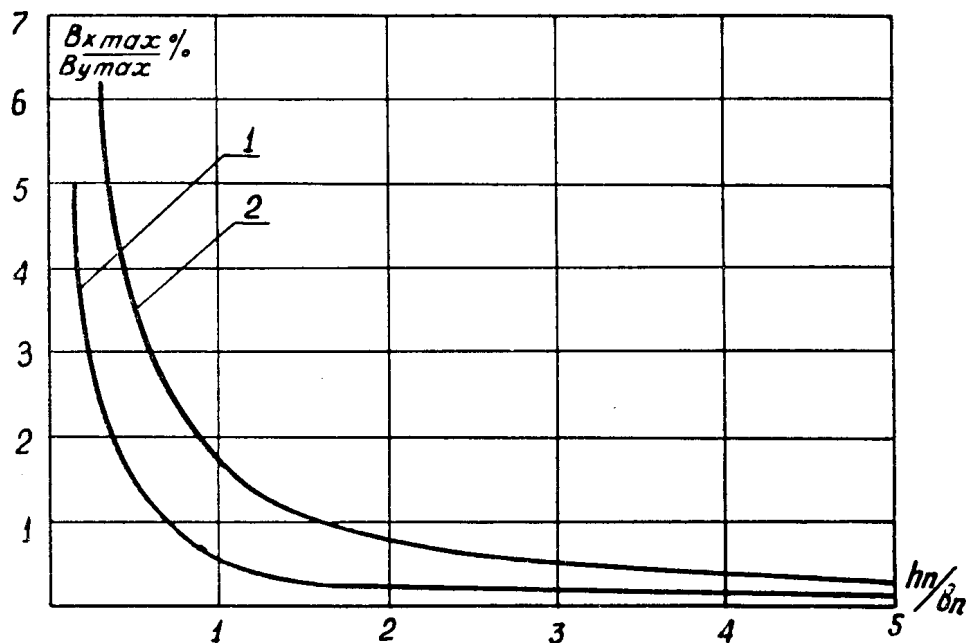


Рис. 3. Зависимость максимального значения индукции на дне паза
от соотношения $\frac{h_n}{b_n}$:
1. $\Delta_{из} = 0,1 b_n$, 2. $\Delta_{из} = 0,05 b_n$

κ_1 . Для пазов с $\kappa = \frac{h_n}{b_n} > 1$ поток рассеяния через дно паза действительно пренебрежительно мал, однако при $\kappa \ll 1$ он резко возрастает. При

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

Нормальная составляющая индукции к стенкам паза (в сечении $y = \frac{\theta_n}{2}$) равна по областям:

1-я область $0 \leq x \leq s_1$

$$B_{yI} = -\frac{\partial A_I}{\partial x} = \mu_0 \frac{2i}{\theta_n} \cdot \frac{\theta_n^2}{4\pi^2 a \theta} \sum_n \frac{\sin n\kappa\theta_1 + (-1)^n \sin [n\kappa(\theta_3 - \theta_2)]}{n^2} \times \\ \times (e^{-n\kappa s_1} - e^{-n\kappa s_2}) \operatorname{sh} n\kappa x; \quad (11)$$

2-я область $s_1 \leq x \leq s_2$

$$B_{yII} = \mu_0 \frac{2i}{\theta_n} \left\{ \frac{x - s_1}{a} + \frac{\theta_n^2}{4\pi^2 a \theta} \sum_n \frac{\sin n\kappa\theta_1 + (-1)^n \sin [n\kappa(\theta_3 - \theta_2)]}{n^2} \times \right. \\ \left. \times [e^{-n\kappa x} \cdot \operatorname{sh} n\kappa s_1 - e^{-n\kappa s_2} \operatorname{sh} n\kappa x] \right\}; \quad (12)$$

3-я область $s_2 \leq x \leq s_3$

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

Кривая распределения индукции по высоте паза для варианта $\left(h_n = \frac{1}{2} \theta_n; \Delta_{из} = 0,1\theta_n\right)$ представлена на рис. 4.

Ход кривой и значения индукции в плоскостях S_1, S_2, S_3 несколько отличаются от значений, которые имели бы место при расчете мето-

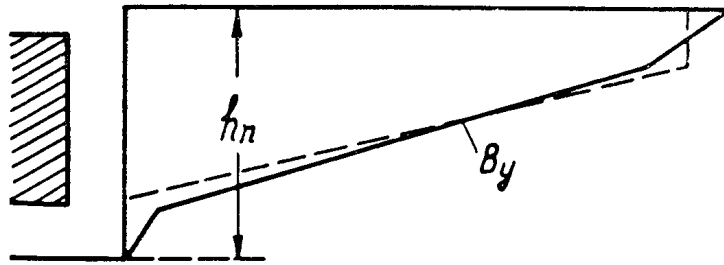


Рис. 4. Распределение индукции по высоте паза: $h_n = 0,5 b_n$

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 $h_n \geq 0,5 \theta_n$, а также при расчетах в первом приближении этими отклонениями можно пренебречь.

В большинстве случаев можно пренебречь также потоком через дно паза — относительная величина максимального значения индукции B_x при $h_n \geq 0,5 \theta_n$ не превышает 5%. При $h_n \leq 0,5 \theta_n$ пренебрежение потоком рассеяния через дно паза вносит существенные погрешности. Для подтверждения теоретических положений о наличии потоков рассеяния

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

- № 1 по высоте паза, шириной h_p ,
 № 2 по ширине паза, шириной b_p ,
 № 3 —, — $\frac{1}{2} b_p$,
 № 4 —, — $\frac{1}{4} b_p$.

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

Таблица 1

Значения индукции в различных сечениях паза

№	$\frac{\Delta_{из}}{b_p}$	$\frac{h_p}{b_p}$	B_{yI}	B_{yII}	B_{yIII}	B_x
1	0,05	5	0,0013	1,0	1,004	0,0012
2	0,05	2	0,0034	0,998	1,010	0,0028
3	0,05	1	0,0073	0,990	1,022	0,0064
4	0,05	0,5	0,0165	0,977	1,049	0,0145
5	0,05	0,2	0,048	0,951	1,157	0,0415
6	0,1	5	0,0036	0,999	1,005	0,0023
7	0,1	2	0,0093	0,989	1,012	0,0062
8	0,1	1	0,023	0,975	1,023	0,0140
9	0,1	0,5	0,062	0,945	1,073	0,0364
10	0,1	0,3	0,180	0,850	1,160	0,0530

Примечание: За единицу принято значение индукции в сечении S_2 , рассчитанное методом полных токов: $B_{yII} = \mu_0 \frac{2i}{b_p}$.

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 Stoßleistungsgenerator für das schaltwerk der s-s, Siemens — Z, 1962, 36, № 8.
5. Morgan John, William Harold, Wilking John Thomas «Improvements in and relating to dynamo-electric machines. The English Electric 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.