

## РАСЧЕТ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ В КРИВОЙ Э.Д.С. УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, К. А. ХОРЬКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники).

Одной из особенностей конструкции генератора ударной мощности является наличие пазов под успокоительную обмотку на большом зубце ротора. Являясь менее глубокими по сравнению с основными пазами, занятыми обмоткой возбуждения, эти пазы оказывают такое же влияние на проводимость воздушного зазора машины, как и основные пазы ротора [1, 2]. Благодаря этому выражение для проводимости зубцового слоя ротора при гладком статоре можно записать как

$$\lambda_p = \frac{1}{k_{\delta p}} - \sum_m (-1)^m \lambda_m \cos m z'_2 \frac{\pi}{\tau} x. \quad (1)$$

Аналогичное выражение имеет проводимость зубцового слоя статора при гладком роторе:

$$\lambda_c = \frac{1}{k_{\delta c}} - \sum_k (-1)^k \lambda_k \cos k z'_1 \left( \frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right), \quad (2)$$

где  $k_{\delta p}$ ,  $k_{\delta c}$  — коэффициенты воздушного зазора ротора и статора,  
 $z'_2$ ,  $z'_1$  — число зубцовых делений ротора и статора,  
 $\lambda_m$ ,  $\lambda_k$  — амплитуды гармоник проводимости зубцового слоя ротора и статора,  
 $m$ ,  $k$  — показатели порядка гармоник проводимости ротора и статора,  
 $\tau$  — полюсное деление машины,  
 $x$  — текущая координата.

Полную относительную проводимость воздушного зазора машины при двухсторонней зубчатости можно рассчитывать как произведение проводимостей зубцовых слоев каждой из сторон [3], тогда:

$$\begin{aligned} \lambda = & \frac{1}{k_{\delta}} - \frac{1}{k_{\delta p}} \sum_k (-1)^k \lambda_k \cos k z'_1 \left( \frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right) - \\ & - \frac{1}{k_{\delta c}} \sum_m (-1)^m \lambda_m \cos m z'_2 \frac{\pi}{\tau} x + \\ & + \sum_k \sum_m (-1)^{m+k} \lambda_k \lambda_m \cos k z'_1 \left( \frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right) \cos m z'_2 \frac{\pi}{\tau} x. \end{aligned} \quad (3)$$

Амплитуды проводимостей  $\lambda_k$  и  $\lambda_m$  применительно к асинхронным машинам, имеющим, как правило, полузакрытые пазы на стато-

ре и на роторе, определяются в виде произведения коэффициентов  $\beta$  и  $\eta_i$  [3], причем

$$\beta = \frac{B_0}{B_m} = f\left(\frac{b_n}{\delta}\right), \quad \eta_i = f\left(\frac{b_n}{t} \text{ и } \frac{t}{\delta}\right).$$

Значение коэффициентов  $\beta$  и  $\eta_i$  даны в виде кривых на рис. 1.

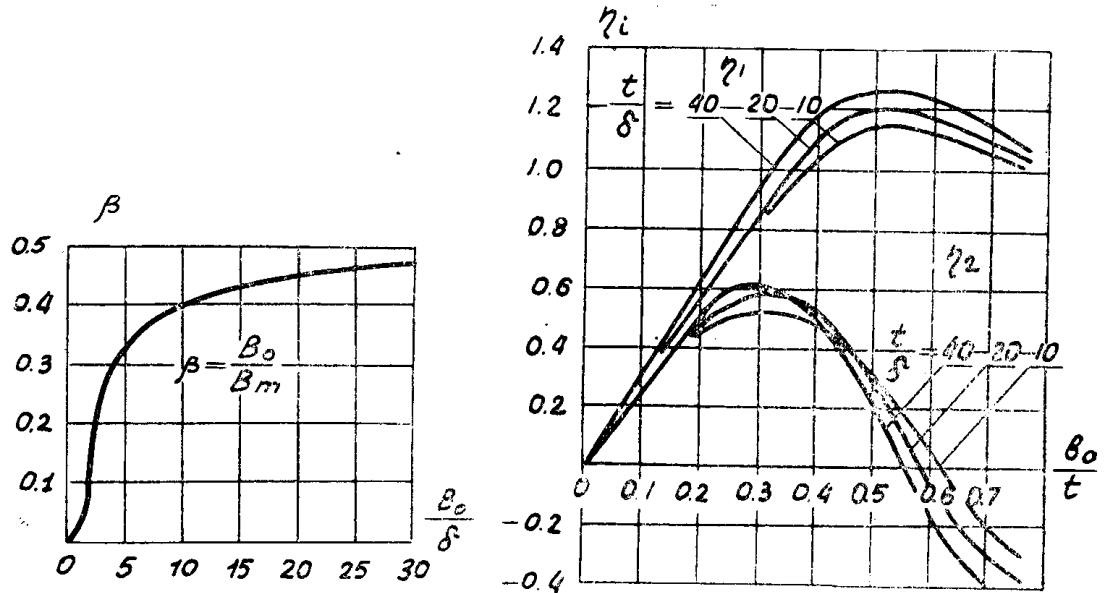


Рис. 1. К расчету амплитуд гармонических проводимостей зубцовых зон.

Так как ударные генераторы имеют преимущественно открытые пазы на статоре и на роторе, то для них расчет проводимостей  $\lambda_k$  и  $\lambda_m$  по указанной выше методике приводит к завышенным значениям э. д. с. зубцовых гармонических. В этом случае расчетные значения получаются более близкими к действительным, если в выражения, по которым определяются  $\lambda_k$  и  $\lambda_m$ , ввести коэффициент  $\alpha$ , учитывающий уменьшение амплитуды зубцовых потоков одной стороны за счет наличия открытых пазов на другой стороне, тогда

$$\lambda_{k(m)} = \alpha \beta \eta_i. \quad (4)$$

При этом величина коэффициента  $\alpha$  с достаточной степенью точности может быть принята равной  $\frac{1}{k_\delta}$ .

Поле в воздушном зазоре машины определяется по выражению

$$B = \frac{\psi_0}{\delta} \lambda F, \quad (5)$$

где  $F$  — намагничивающая сила обмотки возбуждения,

$\delta$  — величина одностороннего воздушного зазора машины.

В общем случае кривая намагничивающей силы ротора ударного генератора представляет из себя равнобедренную трапецию, симметричную относительно оси  $d$  полюсов. Разложение кривой н. с. в ряд дает:

$$F = \frac{4}{\pi} F_m \sum_i \frac{\sin i \gamma \frac{\pi}{2}}{i^2 \gamma \frac{\pi}{2}} \cos i \frac{\pi}{\tau} x, \quad (6)$$

где  $F_m = I_b \omega_b$  — амплитуда намагничивающей силы обмотки возбуждения,

$i$  — порядок пространственной гармоники намагничивающей силы.

Результирующее поле машины можно рассматривать как совокупность пространственных гармонических намагничивающей силы, неподвижных относительно оси ротора  $d$  и вращающихся вместе с ротором. Интегрирование выражения (5) с учетом (3) и (6) в пределах от  $-\frac{\tau}{2}$  до  $+\frac{\tau}{2}$  дает величину потока ротора на единицу длины машины.

$$\Phi = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} B dx = \frac{8 \mu_0 F_m}{\pi^2 \delta \gamma} \sum_i \frac{1}{i^2} \sin i \gamma \frac{\pi}{2} \cdot \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} \lambda \cos i \frac{\pi}{\tau} x \cdot dx. \quad (7)$$

Рассмотрим отдельные составляющие общего потока, полученные после интегрирования выражения (7).

1. Основной поток машины — результат взаимодействия н. с. обмотки возбуждения с проводимостью приведенного воздушного зазора, то есть поток за счет пространственных гармонических поля обмотки возбуждения при бесконечно узких прорезях пазов статора и ротора:

$$\Phi_0 = \frac{8 \mu_0 F_m}{\pi^2 \delta k_\delta \gamma} \sum_i \frac{1}{i^2} \sin i \gamma \frac{\pi}{2} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} \cos i \frac{\pi}{\tau} x \cdot dx.$$

Отсюда поток  $i$ -той пространственной гармоники машины

$$\Phi_i = \frac{16}{\pi^3} \frac{\tau}{\gamma} \frac{\mu_0}{\delta k_\delta} F_m \frac{1}{i^3} \sin i \gamma \frac{\pi}{2} \sin i \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

и, в частности, поток первой гармоники

$$\Phi_1 = \frac{16}{\pi^3} \frac{\tau}{\gamma} \frac{\mu_0}{\delta k_\delta} F_m \sin \gamma \frac{\pi}{2}.$$

Выражая потоки  $i$ -тых пространственных гармонических через поток первой гармоники, получаем

$$\Phi_i = \Phi_1 \frac{1}{i^3} \frac{\sin i \gamma \frac{\pi}{2}}{\sin \gamma \frac{\pi}{2}} \sin i \frac{\pi}{2}.$$

Если обозначить через

$$B_{mi} = \frac{\mu_0}{\delta k_\delta} F_{bi}, \quad F_{bi} = \frac{8}{\pi^2 i^2} k_{pi} F_m, \quad k_{pi} = \frac{\sin i \gamma \frac{\pi}{2}}{\gamma \sin i \frac{\pi}{2}},$$

то выражение (8) для  $i$ -той гармоники получим в том виде, в каком его обычно приводят в учебниках:

$$\Phi_i = \frac{2}{\pi} \tau l \frac{1}{i} B_{mi}.$$

2. Зубцовые потоки—результат взаимодействия н.с. обмотки возбуждения с проводимостью зубцовых слоев реального воздушного зазора, то есть потоки, связанные с проводимостью зубцового слоя ротора  $\Phi_{z'_2}$  и зубцового слоя статора  $\Phi_{z'_1}$ :

$$\Phi_{z'_2} = \frac{8}{\pi^2} \frac{\mu_0}{\delta k_\delta} \frac{F_m}{\gamma} k_{\delta p} \sum_i \frac{1}{i^2} \sin i\gamma \frac{\pi}{2} \times \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} \cos mz'_2 \frac{\pi}{\tau} x \cdot \cos i \frac{\pi}{\tau} x \cdot dx, \quad (9)$$

$$\Phi_{z'_1} = \frac{8}{\pi^2} \frac{\mu_0}{\delta k_\delta} \frac{F_m}{\gamma} k_{\delta c} \sum_i \frac{1}{i^2} \sin i\gamma \frac{\pi}{2} \times \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} \lambda_k (-1)^{k+1} \cos i \frac{\pi}{\tau} x \cdot \cos kz'_1 \left( \frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right) \cdot dx. \quad (10)$$

Отсюда поток какой-либо гармонической за счет  $m$ -го порядка проводимости зубцового слоя ротора и  $i$ -той гармоники н.с. будет

$$\Phi_{\nu m} = \frac{1}{2} \Phi_i k_{\delta p} \lambda_m (-1)^{m+1} \left[ \frac{i}{i - mz'_2} \frac{\sin (i - mz'_2) \frac{\pi}{2}}{\sin i \frac{\pi}{2}} + \frac{i}{i + mz'_2} \frac{\sin (i + mz'_2) \frac{\pi}{2}}{\sin i \frac{\pi}{2}} \right], \quad (11)$$

а поток  $\nu$ -той гармонической за счет  $k$ -того порядка проводимости зубцового слоя статора  $i$ -той гармоники н.с. равен:

$$\Phi_{\nu k} = \frac{1}{2} \Phi_i k_{\delta c} \lambda_k (-1)^{k+1} \left[ \frac{i}{i - kz'_1} \frac{\sin (i - kz'_1) \frac{\pi}{2}}{\sin i \frac{\pi}{2}} + \frac{i}{i + kz'_1} \frac{\sin (i + kz'_1) \frac{\pi}{2}}{\sin i \frac{\pi}{2}} \right] \cos kz'_1 \omega t. \quad (12)$$

Следует отметить, что за счет гармоник проводимости зубцового слоя ротора получаем гармоники потока неподвижные относительно оси  $d$  ротора, то есть вращающиеся синхронно с ротором. Из всех гармоник, связанных с зубчатостью ротора, наиболее значительными являются гармонические, полученные от первой гармоники н.с. Номер этих гармонических, которые принято называть зубцовыми, равен

$$\nu_m = 1 \mp mz'_2.$$

Из зубцовых гармонических наибольшую амплитуду имеют гармонические первого порядка  $m=1$ . В этом случае

$$\nu_m = 1 \mp z'_2.$$

При наличии в поле н. с. обмотки возбуждения сильно выраженных гармонических третьего, пятого, седьмого и др. порядков появляются потоки гармонических:

$$3 \mp mz'_2, 5 \mp mz'_2 \quad \text{и т. д.}$$

За счет гармонических проводимости зубцового слоя статора, вращающихся относительно оси  $d$  ротора с угловой частотой  $\omega kz'_1$ , создаются гармонические потока  $\Phi_{z'_1}$ . Из всех гармонических этого потока наиболее опасными являются гармонические от первой гармоники н. с.  $i=1$ , которые принято называть зубцовыми. Номер их равен

$$\nu_k = 1 \mp kz'_1.$$

Наибольшую амплитуду имеют гармонические за счет проводимости первого порядка  $k=1$ . В этом случае

$$\nu_k = 1 \mp z'_1.$$

При наличии в кривой н. с. значительных гармонических третьего, пятого и др. порядков следует рассматривать также потоки гармонических:

$$3 \mp kz'_1, 5 \mp kz'_1 \quad \text{и т. д.}$$

При наличии успокоительной системы на роторе следует учитывать ее демпфирующее действие. В [4] приводится коэффициент демпфирования высших гармонических потока  $\Phi_{z'_1}$  успокоительной обмоткой:

$$D_\nu = 1 - \frac{j_{2\nu}^2 f_{\text{ск}\nu}^2}{1 + \sigma_{2\nu}}, \quad (13)$$

где  $f_{2\nu}$  — обмоточный коэффициент  $\nu$ -той гармоники,

$f_{\text{ск}\nu}$  — коэффициент скоса пазов,

$\sigma_{2\nu}$  — коэффициент рассеяния ротора.

Величину  $\sigma_{2\nu}$  можно принять равной нулю, тогда при  $f_{\text{ск}\nu} = 1$

$$D_\nu = 1 - f_{2\nu}^2,$$

где 
$$f_{2\nu} = \frac{\sin \nu \frac{\pi p}{z'_2}}{\nu \frac{\pi p}{z'_2}}.$$

Зависимость  $D_\nu = f\left(\frac{\nu p}{z'_2}\right)$  представлена на

рис. 2, откуда следует, что низшие гармонические почти полностью демпфируются успокоительной обмоткой. Гармонические, номер которых близок к числу зубцов ротора, практически не демпфируются. Экспериментальные данные, приведенные в табл. 2, подтверждают, что в кривой э. д. с. обмотки статора имеются явно выраженные зубцовые гармонические с номерами  $1 \mp z'_1$ .

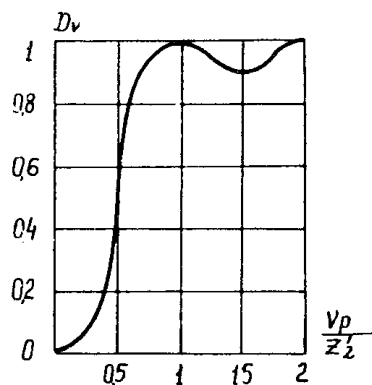


Рис. 2. Зависимость коэффициента демпфирования высших гармонических от отношения между номером гармоники и числом демпферных стержней ротора.

3. Поток, связанный с проводимостью зубцовых зон статора, ротора и н. с. обмотки возбуждения

$$\Phi_{z'_1 z'_2} = \frac{8}{\pi^2} \frac{p_0}{\delta k_\delta} \frac{F_m}{\gamma} k_\delta \sum_i \frac{1}{i^2} \sin i\gamma \frac{\pi}{2} \sum_k \sum_m (-1)^{k+m} \lambda_k \lambda_m \times$$

$$\times \cos kz'_1 \omega t \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos i \frac{\pi}{\gamma} x \cdot \cos mz'_2 \frac{\pi}{\gamma} x \cdot \cos kz'_1 \frac{\pi}{\gamma} x \cdot dx. \quad (14)$$

Откуда поток какой-либо одной гармонической за счет  $k$ -того и  $m$ -го порядков проводимостей зубцовых слоев статора, ротора и  $i$ -той гармоники н. с. будет равен

$$\Phi_{\nu km} = \frac{1}{4} \Phi_i k_\delta \lambda_k \lambda_m (-1)^{k+m} \left[ \frac{i}{i \pm kz'_1 \mp mz'_2} \frac{\sin (i \pm kz'_1 \mp mz'_2) \frac{\pi}{2}}{\sin i \frac{\pi}{2}} + \right.$$

$$\left. + \frac{i}{i \pm kz'_1 \pm mz'_2} \frac{\sin (i \pm kz'_1 \pm mz'_2) \frac{\pi}{2}}{\sin i \frac{\pi}{2}} \right] \cos kz'_1 \omega t. \quad (15)$$

Из всего спектра частот потока  $\Phi_{\nu km}$  играют некоторую роль только разностные гармонические, частота которых равна:

$$\nu_{km} = i \pm (kz'_1 - mz'_2).$$

При наличии успокоительной обмотки на роторе эти потоки будут в сильной степени демпфированы, поэтому потоками  $\Phi_{\nu km}$  практически можно пренебречь.

Таблица 1

| $z'_2$ | $b_{n2}$ | $t_2$ | $\gamma$ | $\beta_{(p)}$ | $\eta_{1(p)}$ | $\beta_{(c)}$ | $\eta_{1(c)}$ | $k_{\delta p}$ | $k_{\delta c}$ |
|--------|----------|-------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| 20     | 6,5      | 16,1  | 0,70     | 0,42          | 1,20          | 0,31          | 0,65          | 1,43           | 1,15           |
| 26     | 6,0      | 12,4  | 0,69     | 0,41          | 1,15          | 0,31          | 0,65          | 1,52           | 1,15           |
| 28     | 6,5      | 11,5  | 0,71     | 0,42          | 1,20          | 0,31          | 0,65          | 1,75           | 1,15           |

По изложенной методике были рассчитаны потоки и наводимые ими э.д.с. в витке с диаметральной шагом, расположенном на статоре.

Таблица 2

| $\nu$ | $z'_2 = 20$ |         | $z'_2 = 26$ |         | $z'_2 = 28$ |         |
|-------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
|       | Расчет      | Экспер. | Расчет      | Экспер. | Расчет      | Экспер. |
| 19    | 31,5        | 34      |             |         |             |         |
| 21    | 31,5        | 30,8    |             |         |             |         |
| 23    |             |         | 8,3         | 6,25    | 5,45        | 3,00    |
| 25    |             |         | 39,9        | 40,5    | 7,40        | 4,00    |
| 27    |             |         | 32,1        | 31,3    | 38,1        | 36,3    |
| 29    |             |         |             |         | 38,1        | 34,5    |

Расчеты проведены для машины со статором, имеющим 24 полузакрытых паза с открытием 3 мм и зубцовым шагом 13.6 мм, и комплектом роторов с числами зубцовых делений 20, 26 и 28. Геометрические параметры зубцовых зон ротора и расчетные коэффициенты представлены в табл. 1. Результаты расчета зубцовых гармонических и экспериментальные данные приведены в табл. 2. Как следует из табл. 2, совпадение расчетных данных с экспериментом удовлетворительное.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. О высших гармонических в кривой э. д. с. ударного генератора. Межвузовский сборник трудов, вып. 3. Вопросы теории и проектирования электрических машин, Новосибирск, 1963.
  2. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. К выбору обмотки ротора ударного генератора. Известия ТПИ, т. 138, 1965.
  3. А. И. Вольдек. Влияние неравномерности воздушного зазора на магнитное поле асинхронной машины. Электричество, № 12, 1951.
  4. Т. Г. Сорокер. Дифференциальное рассеяние многофазных синхронных электродвигателей. ВЭП № 6, 1956.
-