

## МНОГОПОЛЮСНЫЙ ГЕНЕРАТОР УДАРНОЙ МОЩНОСТИ КАК НАКОПИТЕЛЬ И ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

В. Ф. КУЛАКОВ, Г. А. СИПАЙЛОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Необходимость создания ударных генераторов большой единичной мощности определяется растущими потребностями современной науки и техники, с одной стороны, и экономическими преимуществами крупных машин, с другой.

В отличие от обычных машин увеличение мощности ударных генераторов не может быть достигнуто путем повышения линейной нагрузки, а лишь за счет увеличения объема машины и некоторого повышения магнитной индукции при возможно малом сверхпереходном индуктивном сопротивлении.

Ограниченные по условиям механической прочности размеры ротора двухполюсного ударного генератора, широко распространенного в настоящее время, не позволяют создать машину достаточно большой ударной мощности. Реальная возможность укрупнения мощности ударных генераторов заключается в переходе к многополюсному исполнению машин.

Для доказательства такой возможности выразим ударную мощность однофазного генератора  $P_{уд1}$ , под которой понимается произведение максимального значения ударного тока с учетом его апериодической составляющей  $I_{уд}$  на амплитудное значение э.д.с.  $E_m$  через геометрические соотношения и параметры [1]

$$P_{уд1} = \frac{2E_m^2 \cdot k_z^2 k_f^2}{x''_d}, \quad (1)$$

где

$k_z$  — коэффициент затухания амплитуды ударного тока;

$k_f = \frac{E_f}{E_m}$  — коэффициент форсировки.

$$E_m = 2\pi f W_1 k_{w1} \frac{2}{\pi} k_f B_\delta \tau l, \quad (2)$$

где

$f$  — частота;

$B_\delta$  — индукция в воздушном зазоре;

$l$  — активная длина;

$k_f \approx 1$  — коэффициент формы поля.

В однофазных машинах принимают число пазов статора, заполненных обмоткой, равным  $2/3$  от полного числа пазов  $z$ . Тогда число пазов

на полюс и фазу  $q = \frac{z}{3p}$  и  $W_1 = pq$ .

Выражая полюсное деление  $\tau$  через окружную скорость ротора  $v_{\text{окр}}$  и частоту  $f$

$$\tau = \frac{v_{\text{окр}}}{2f},$$

заменяя

$$l = \frac{\tau}{\beta} = \frac{v_{\text{окр}}}{2f\beta},$$

получим при среднем значении обмоточного коэффициента  $k_{w1} = 0,82$

$$E_m = 0,82 \frac{qB_s v_{\text{окр}}^2 \cdot p}{f\beta}. \quad (3)$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление

$$x''_d = x_{s1} + \left( \frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{sb}} + \frac{1}{x_d} \right)^{-1}, \quad (4)$$

здесь  $x_{s1}$ ,  $x_{sb}$ ,  $x_{sd}$  — индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора, возбуждения и демпферной;

$x_{ad}$  — индуктивное сопротивление реакции якоря.

Основную долю сверхпереходного сопротивления составляет сопротивление рассеяния обмотки статора. Как показывают расчеты и эксперименты, проведенные на модели явнополюсного ударного генератора, величина сверхпереходного сопротивления  $x''_d$  в явнополюсной машине с демпферной обмоткой может составлять  $1,28 \div 1,35 x_{s1}$ , что несколько выше, чем в генераторе неявнополюсного типа из-за большого рассеяния контуров явнополюсного ротора.

Индуктивное сопротивление рассеяния статора найдем по обычной формуле

$$x_{s1} = 4\pi f \mu_0 l \frac{W_1^2}{pq} \Sigma \lambda. \quad (5)$$

Проводимость рассеяния  $\Sigma \lambda = \lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{л}} + \lambda_{\text{в}}$ .

Проводимость пазового рассеяния

$$\lambda_{\text{п}} = \left( \frac{h_1}{3b_{\text{п}}} + \frac{h_k + h_u}{b_{\text{п}}} \right) k_{\text{п}}, \quad (6)$$

где

$k_{\text{п}}$  учитывает насыщение зубца.

Полная высота паза  $h_{\text{п}}$  включает в себя высоту клина  $h_k$ , которая определяется требованием безопасности обмотки и составляет величину порядка 2 см, двойную высоту изоляции  $h_u$ , определяемую напряжением генератора и высоту меди обмотки статора  $h_1$ .

$$h_{\text{п}} = h_1 + h_k + 2h_u. \quad (7)$$

Учитывая это, пазовую проводимость можно представить в следующем виде:

$$\lambda_{\text{п}} = \left( \frac{1}{3} k_1 + \frac{2h_k + h_u}{3\xi t_1} \right) k_{\text{п}}, \quad (8)$$

где  $t_1$  — зубцовый шаг

$$\xi = \frac{b_n}{t_1} \quad \text{и} \quad k_1 = \frac{h_n}{b_n}.$$

Проводимость лобового рассеяния

$$\lambda_L = (0,47I_{л\text{ср}} - 0,3\tau) \cdot \frac{q}{1} k_3, \quad (9)$$

$k_3$  — коэффициент, учитывающий экранирующее действие бандажей. Поскольку при однофазной концентрической обмотке средняя длина лобовых частей  $I_{л\text{ср}} \approx 1,2\tau$ , то

$$\lambda_L = 0,26 \cdot \beta q k_3. \quad (10)$$

Проводимость дифференциального рассеяния в явнополюсных машинах

$$\lambda_\delta = \frac{\delta'}{b_n + 0,8\delta'} = \frac{\delta'}{\xi t_1 + 0,8\delta'}, \quad (11)$$

где  $\delta'$  — приведенный воздушный зазор.

Коэффициент затухания амплитуды ударного тока  $k_3$  обусловлен в основном двумя постоянными времени, — постоянной затухания сверхпереходного процесса  $T''_d$ , определяемой соотношением рассеяния и активными сопротивлениями контуров ротора и апериодической составляющей  $T_a$ , затухание которой зависит от активного и индивидуального сопротивления рассеяния обмотки статора

$$k_3 = \frac{1 + e^{-\frac{1}{2iT_d''}} + 2e^{-\frac{1}{2iT_a}}}{4}. \quad (12)$$

Чтобы уменьшить затухание сверхпереходной составляющей ударного тока, постоянная времени которой

$$T''_d = \frac{\sigma_{вд} T_B T_d}{T_B + T_d}, \quad (13)$$

следует иметь значения постоянных времени контуров возбуждения  $T_B$  и демпферного  $T_d$  по возможности близкими, т. е. увеличивать сечение меди демпферной обмотки до величины, близкой к сечению меди обмотки возбуждения.

Постоянная времени апериодического процесса

$$T_a = \frac{x''_d + x''_q}{2\omega r_1} \approx \frac{1,3x_{s1}}{\omega r_1}, \quad (14)$$

где активное сопротивление обмотки статора

$$r_1 = \rho \frac{l_w p q}{s} = \frac{2\rho\tau p q \left( \frac{1}{\beta} + 1,2 \right)}{k_1 \xi^2 t_1^2 k_{зап}}, \quad (15)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление,

$$l_w = 2(1 + I_{л\text{ср}}) = 2\tau \left( \frac{1}{\beta} + 1,2 \right) \text{ — средняя длина витка.}$$

Сечение меди  $s = k_1 b_n^2 k_{зап}$ .

$k_{зап}$  — коэффициент заполнения паза медью, являющейся сложной функцией от размеров паза и напряжения генератора. Следует принять во внимание, что индукция в зубцах статора  $B_{z1}$  и, следовательно, индукция в воздушном зазоре  $B_\delta = B_{z1}(1 - \xi)$  может быть увеличена при понижении частоты  $f$  генератора. Это обстоятельство оправдано еще

тем, что высота зубцов в ударном генераторе невелика и намагничивающий ток увеличится незначительно. Насыщение зубцов снижает индуктивное сопротивление рассеяния генератора, повышая тем самым его мощность.

Выражение ударной мощности после подстановки (3), (5) в (1)

$$P_{уд1} = 0,17 \cdot 10^6 \frac{B_{\delta}^2 v_{окр}^3 q k_3^2 k^2 \phi}{f^2 \beta \Sigma \lambda \cdot k} p; \quad (16)$$

здесь  $k = \frac{x''_d}{x_{s1}} = 1,28 \div 1,35$  в зависимости от рассеяния контуров ротора;

$$B_{\delta} = B_{z1}(1 - \xi)$$

$k_3$  и  $\Sigma \lambda$  находятся по (6), (7), (8), (9).

Из уравнения (12) видно, что при прочих равных параметрах мощность ударного генератора линейно возрастает с увеличением числа пар полюсов  $p$ .

Можно показать, что плотность кинетической энергии вращающегося ротора  $q_{\omega}$  также определяется окружной скоростью

$$q_{\omega} = \frac{\frac{1}{2} J \omega^2}{V_p} = \frac{\gamma}{4} v_{окр}^2; \quad (17)$$

здесь

$V_p$  — объем ротора,

$\gamma$  — средняя плотность материала ротора.

Для того, чтобы улучшить энергетические и весовые показатели ударного генератора как накопителя, следует, по возможности, повышать окружную скорость. Однако вследствие особенностей конструкции многополюсных машин окружная скорость ротора может быть принята по условиям механической прочности не более 160 м/сек в явнополюсных генераторах с дисковым ободом и около 120 м/сек при сегментированном обode.

Характер изменения ударной мощности на пару полюсов в зависимости от величины окружной скорости  $v_{окр}$  и относительной длины машины  $\beta = \frac{\tau}{l}$  показан на рис. 1.

Оптимальные соотношения размеров, в частности оптимальная геометрия зубцовой зоны статора, находятся из условия максимума ударной мощности (уравнение 16) в зависимости от входящих в него параметров.

Выводы относительно оптимальной геометрии зубцовой зоны статора явнополюсного ударного генератора, в общем, сходны с рекомендациями по пректированию неявнополюсного ударного генератора [2].

Однако относительная глубина паза  $k_1 = \frac{h_n}{b_n}$  имеет несколько большее значение, порядка 2,6—3,3.

Кроме того, если нет специальных требований к напряжению генератора, рекомендуется выбирать обмотку с меньшим числом пазов на полюс и фазу и зубцовый шаг  $t_1$  порядка 8—10 см.

При условии постоянства индукции в зубцах статора ударная мощность сравнительно мало зависит от относительной ширины паза

$\xi = \frac{b_n}{t_1}$  и в пределах изменения ее от 0,3 до 0,38 может считаться оптимальной. В качестве примера на рис. 2 построены кривые, иллюстри-

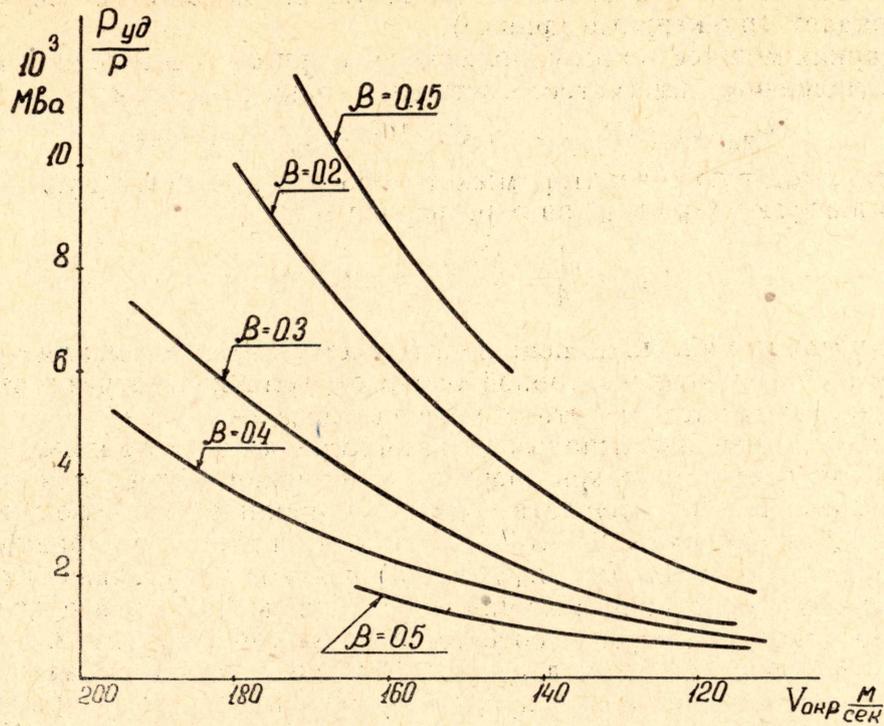


Рис. 1. Изменение ударной мощности на пару полюсов в зависимости от окружной скорости ротора

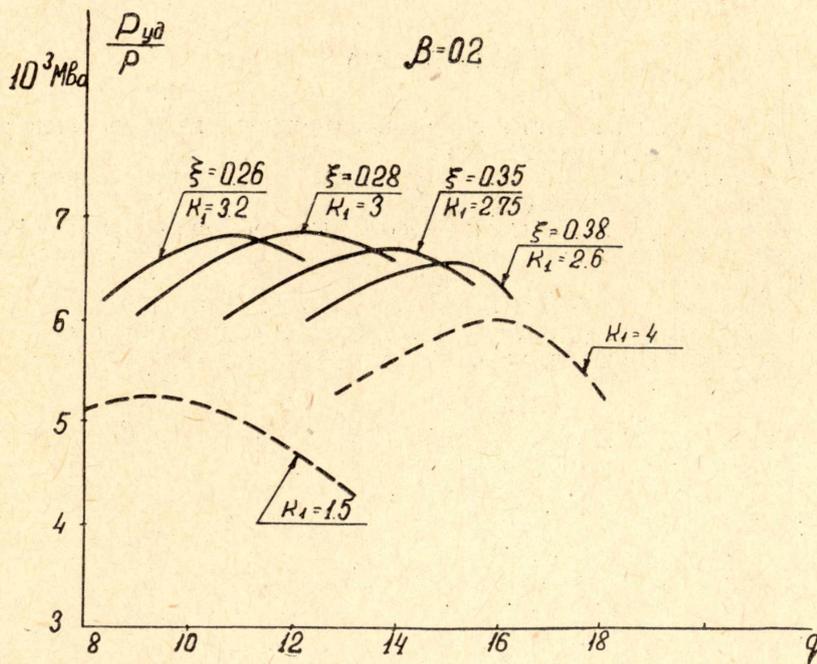


Рис. 2. К определению оптимальной геометрии зубовой зоны статора

рующие зависимость ударной мощности на пару полюсов для восьми-полюсного  $p=4$  ударного генератора, окружная скорость поверхности ротора которого  $v_{окр}=160$  м/сек, от параметров  $q$ ,  $k_1$  и  $\xi$ . Частота э.д.с. генератора  $f=50$  гц, индукция в зубцах статора  $B_{z1}=1,8$  тл,  $\beta=0,2$ .

Кривые построены для оптимальных значений  $k_1 = \frac{h_n}{b_n}$ , в случае,

если это отношение отклоняется в большую или меньшую сторону, мощность падает (пунктирные кривые).

Ударная мощность восьмиполусного ударного генератора при удачных соотношениях параметров составляет, таким образом,

$$P_{уд1} = p \cdot P_{удр} = 4,6,8 \cdot 10^3 = 27,2 \cdot 10^3 \text{ Мва,}$$

и энергия, которую генератор может передать в индуктивную согласованную нагрузку ( $x_n = x''_a$ ) за один период э. д. с.,

$$Q_n = \frac{1}{4} \frac{P_{уд1}}{\omega} = 21,6 \text{ Мдж.}$$

В случае применения специальных схем [3, 4], в частности при совместной работе с конденсаторной батареей, величина энергии, отдаваемой генератором, может быть увеличена еще в 2—3 раза.

Весьма заманчиво использование многополюсных ударных генераторов в качестве источников энергии со временем ее передачи порядка 0,04—0,1 сек. В этом случае генератор выполняется на пониженную частоту э. д. с., например, 25,  $16^{2/3}$ , 12,5 и т. д. гц, тогда при равном диаметре рашотки статора  $D$  ( $v_{окр} = \text{const}$ ) и длине  $l$  и уменьшении числа пар полюсов в сравнении с машиной на 50 гц в 2, 3 и более раз величина передаваемой энергии соответственно увеличивается в 2, 3 и т. д. раз. В частности, восьмиполусный генератор, который показан в примере, будучи выполнен с  $p=2$  при длительности импульса ударного тока около 0,04 сек., сможет передать в индуктивную нагрузку более 40 Мдж. Эта энергия может быть увеличена как за счет схемных решений [3, 4], так и за счет дальнейшего уменьшения частоты многополюсных генераторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Постников. Получение максимальных величин электрокинетической энергии. Труды ЛПИ, № 2, 1937.
2. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. К выбору основных размеров ударного генератора. Известия ТПИ, 1964, т. 132.
3. В. В. Ивашин, Г. А. Сипайлов. Способ накопления энергии от ударного генератора. Авторское свидетельство № 173823, Бюллетень изобретений, № 16, 1965.
4. Г. А. Сипайлов, В. В. Ивашин, К. А. Хорьков, А. В. Лоос. Получение больших электромагнитных энергий при совместной работе ударного генератора и конденсаторной батареи. «Электричество», 1967, № 8.