

К ВЫБОРУ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ СТАТОРА УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

(Представлена научным семинаром НИИ АЭМ)

Г. А. СИПАЙЛОВ, К. А. ХОРЬКОВ, В. З. ХОРЬКОВА, В. С. БАКЛИН,
В. И. АНДРЕЕВ

В настоящее время увеличение мощности отдельного ударного генератора является очередной задачей исследования электромашиностроителей. Ударные генераторы предельных мощностей требуются не только для лабораторий разрывных мощностей, но и для проведения современных научных исследований в области физики твердого тела, плазмы, ускорительной техники и т. д.

Современные ударные генераторы изготавливаются на базе существующих турбогенераторов. Вопросы проектирования турбогенераторов разработаны достаточно полно, и это существенно облегчает задачу создания ударных генераторов. Однако ряд вопросов, связанных с индивидуальными особенностями этих машин, определяемыми условиями их работы, требуют дальнейшего исследования и решения. Например, не решен окончательно вопрос о проектировании зубцовой зоны статора: четкие рекомендации по выбору числа пазов статора, соотношения между шириной паза и зубцовым шагом, соотношения между высотой паза и его шириной отсутствуют.

Имеющиеся рекомендации [1, 3, 4] сводятся в основном к следующему:

1. Число витков статора должно быть по возможности малым, а магнитный поток по возможности большим.

2. Глубина пазов должна быть по возможности малой, а их ширина по возможности большой.

Высоту пазов статора ударного генератора в настоящее время принято уменьшать в 1,7—2,5 раза [2], а отношение высоты паза к его ширине принимать равным 2 (по сравнению с 10 для турбогенераторов), [3, 4]. Например, такую геометрию паза имеют: генератор Капицы — Костенко [3], ударные генераторы завода «Электросила» [4, 5, 6], генераторы фирм Oerlikon [7], Westinghouse [8], Siemens — Schuchert-werke [9] и др. Однако является ли такая геометрия паза оптимальной, окончательно не решено.

Существует ряд высказываний, предостерегающих против чрезмерного снижения высоты паза. В [10] указывается на возрастание затухания свободных составляющих тока короткого замыкания вследствие увеличения активного сопротивления обмотки статора при уменьшении объема меди в пазу, а в [11] указывается на возрастание толщины клина с ростом ширины паза статора, т. е. на возрастание доли рассеяния по высоте клина. Ранее нами исследовалось отношение высоты паза к его ширине [12] и были получены результаты, близкие к рекомендациям [3, 4]. Однако при расчетах нами не ставились жесткие ограничения по плотности тока в пазу и по максимально допустимому напряжению на зажимах машины.

В настоящей работе излагаются результаты более полного исследования геометрии зубцовой зоны генератора ударной мощности с помощью ЭЦВМ. При расчетах ставились ограничения по напряжению и плотности тока, учитывалось влияние толщины изоляции и толщины клина на заполнение пазов медью, учитывалось влияние насыщения на проводимость потоков пазового рассеяния. Расчеты проводились для ряда значений индукции в воздушном зазоре машины.

При выводе уравнений, на основании которых составлялась программа для расчета, была использована методика расчета турбогенераторов [13, 14].

В качестве критерия эффективности рассматриваемых вариантов принимается величина энергии, отдаваемой ударным генератором индуктивной нагрузке с согласованным сопротивлением. Очевидно, что эта энергия составляет одну четвертую часть энергии, которую может запасти обмотка статора генератора при внезапном коротком замыкании.

$$W_{\text{н}} = \frac{1}{4} \frac{x_{\text{уд}} I_{\text{уд}}^2}{2\omega} = \frac{1}{16} \frac{x_{\text{уд}} I_{\text{уд}}^2}{\pi f}, \quad (1)$$

где

$x_{\text{уд}}$ — индуктивное сопротивление обмотки статора ударного генератора при внезапном коротком замыкании в первые моменты времени;

$I_{\text{уд}}$ — амплитуда тока в первый полупериод внезапного замыкания генератора на нагрузку;

f — частота тока.

Амплитуда тока определяется как

$$I_{\text{уд}} = \frac{2\sqrt{2}Uk_3}{Z_{\text{уд}}}, \quad (2)$$

где

$Z_{\text{уд}} = r_1 + jx_{\text{уд}}$ — полное сопротивление обмотки статора;

U — действующее значение напряжения на зажимах генератора с учетом форсировки возбуждения;

k_3 — коэффициент затухания тока.

Величина коэффициента затухания тока зависит от соотношения между индуктивным и активным сопротивлениями обмотки статора. Очевидно, что значения коэффициента затухания уменьшаются при уменьшении сечения меди обмотки.

$$U = 4,44\omega_1 k_{\text{w}1} f \Phi, \quad (3)$$

где

W_1 — число последовательно соединенных витков обмотки статора. Для однофазной однослойной обмотки статора

$$\omega_1 = \frac{pq}{a}, \quad (4)$$

a — число параллельных ветвей обмотки статора;

p — число пар полюсов машины;

q — число пазов на полюс и фазу;

$k_{\text{w}1}$ — обмоточный коэффициент статорной обмотки;

Φ — основной поток машины.

Для машины с неявнополюсным ротором.

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_{\delta} \tau l_i, \quad (5)$$

где

B_{δ} — индукция в воздушном зазоре;

τ — полюсное деление статора;

l_i — расчетная длина активной части машины.

Индуктивное сопротивление обмотки статора ударного генератора при внезапном коротком замыкании зависит от конструкции пазовой и лобовой

части обмотки, от величины фазной зоны и от наличия на роторе демпферной системы.

Однофазная обмотка статора, занимающая 2/3 полюсного деления, аналогична двум фазам трехфазной обмотки, поэтому

$$x_{уд} = \frac{x_d'' + x_2}{2}, \quad (6)$$

где

x_d'' — индуктивное сверхпереходное сопротивление обмотки статора по продольной оси;

x_2 — индуктивное сопротивление обратного следования фаз.

При наличии мощной демпферной системы на роторе $x_{уд} \approx 1,15x_s$ [12], где x_s — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора.

$$x_s = 4\pi f \mu_0 \frac{\omega_1^2}{pq} l_i \Sigma \lambda, \quad (7)$$

$$\Sigma \lambda = \lambda_{\Pi} + \lambda_{л} + \lambda_{к} + \lambda_{д}. \quad (8)$$

Проводимость пазового рассеяния обмотки статора:

$$\lambda_{\Pi} = \left[\frac{h_{M1}}{3b_{\Pi}} + \frac{h_{к}}{b_{\Pi}} \right] k_{н}, \quad (9)$$

где h_{M1} — высота меди в пазу;

b_{Π} — ширина паза;

$h_{к}$ — высота клина и изоляции между клином и медью обмотки;

$k_{н}$ — коэффициент насыщения, учитывающий уменьшение проводимости пазового рассеяния при увеличении насыщения зубца.

Величина коэффициента насыщения зависит от числа пазов на полюс и фазу, геометрии зубца, а также от величины потока рассеяния.

Отношение высоты паза к его ширине обозначаем через

$$k_1 = \frac{h_{\Pi}}{b_{\Pi}}, \quad (10)$$

а отношение ширины зубца к зубцовому шагу — через

$$\xi = \frac{b_z}{t_z}. \quad (11)$$

Проводимость лобового рассеяния

$$\lambda_{л} = k_2 \frac{\tau}{l_i} q k_3, \quad (12)$$

k_2 — коэффициент, учитывающий тип обмотки и конструкцию лобовых частей. Для однослойной концентрической подразделенной обмотки, при числе заполненных пазов 2/3, величина $k_2 = 0,26$.

k_3 — коэффициент экранирования, учитывающий уменьшение рассеяния лобовой части при заключении ее в демпферные конуса.

Величина коэффициента экранирования зависит от близости демпфирующих колец к меди обмотки и от их материала.

Проводимость дифференциального рассеяния

$$\lambda_{д} = \frac{k_{w1}^2 t_z}{\pi^2 k_{\mu} \delta k_{\delta}} (\lambda'_z + \lambda'_b), \quad (13)$$

где k_{μ} — коэффициент магнитной цепи, учитывающий влияние насыщения;

k_{δ} — коэффициент воздушного зазора;

δ — величина воздушного зазора;

λ'_z — проводимость рассеяния для зубцовых гармонических;

λ'_b — проводимость рассеяния для пространственных гармонических.

Проводимость по коронкам зубцов

$$\lambda_{к} = 0,2 + \frac{\delta}{2t_z}. \quad (14)$$

При расчетах на ЭЦВМ предполагалось, что нам известны следующие основные размеры генератора:

τ — полюсное деление статора;
 l_i — расчетная длина активной части машины;
 δ — величина воздушного зазора;
 B_z — максимально допустимая индукция в зубце статора.

Рассматривая двухполюсные ударные генераторы предельной мощности, мы исходим из следующих значений основных величин:

$$\tau = 2,06 \text{ м}, \quad \delta = 0,03 \text{ м}, \quad l_i = 6,0 \text{ м}.$$

Индукция в наиболее узком сечении зубца статора принята равной 2,3 тл, а при форсировке возбуждения 2,65 и 3 тл. При исследовании геометрии зубцовой зоны статора мы считаем, что ротор ударного генератора идеальный, то есть не ставим жестких ограничений по величине индукции в воздушном зазоре.

Ограничения по B_δ вводим при рекомендациях по выбору числа пазов на полюс и фазу статора в соответствующем разделе статьи. Отношение ξ принято нами за одну из основных переменных величин. Оно связывает индукцию в воздушном зазоре машины с индукцией в наиболее узком сечении зубца

$$\xi = \frac{1}{k_c} \frac{B_\delta}{B_z}, \quad (15)$$

где k_c — коэффициент заполнения пакета сталью.

Кроме изменения отношения ширины зубца к зубцовому делению варьировались следующие параметры: отношение высоты паза к его ширине и число пазов на полюс и фазу.

Отношение ширины зубца к зубцовому делению изменялось в пределах 0,4—0,8; отношение высоты паза к его ширине изменялось в пределах 1—3,5; число пазов на полюс и фазу изменялось от 6 до 24.

Результаты расчета представлены в табл. 1—5.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета ударного генератора с 2р—2, $f=50$,
 $\tau=2,06 \text{ м}$, $l_i=6 \text{ м}$, $a=2$, $\xi=0,4$

N	q	k_1	B_σ (тл)	B_z (тл)	U (кВ)	$x_{уд}$ (ом)	$I_{уд}$ (ка)	j (а/мм ²)	W_H (Мдж)
1	8	2	0,985	2,65	5,74	0,0148	1058	31,80	6,60
2	10	2	0,985	2,65	7,17	0,0189	1037	50,70	8,00
3	12	2	0,985	2,65	8,60	0,0234	999	73,70	9,30
4	14	2	0,985	2,65	10,0	0,0284	958	101,9	10,3
5	16	2	0,985	2,65	11,5	0,0337	917	135,8	11,2
6	18	2	0,985	2,65	12,9	0,0394	877	177,2	12,0
7	20	2	0,985	2,65	14,3	0,0455	836	227,7	12,6
8	22	2	0,985	2,65	15,8	0,0504	822	299,2	13,5
9	24	2	0,985	2,65	17,2	0,0564	790	384,2	13,9
10	26	2	0,985	2,65	18,7	0,0629	753	491,4	14,1
11	28	2	0,985	2,65	20,0	0,0697	715	631,9	14,1
12	8	3	0,985	2,65	5,70	0,0189	933	15,60	5,20
13	10	3	0,985	2,65	7,20	0,0247	795	24,10	6,20
14	12	3	0,985	2,65	8,60	0,0302	779	35,40	7,30
15	14	3	0,985	2,65	10,0	0,0357	768	49,80	8,30
16	16	3	0,985	2,65	11,5	0,0417	748	67,00	9,30
17	18	3	0,985	2,65	12,9	0,0481	728	88,10	10,1
18	20	3	0,985	2,65	14,3	0,0549	706	113,6	10,8
19	22	3	0,985	2,65	15,8	0,0621	683	144,9	11,5
20	26	3	0,985	2,65	18,7	0,0777	636	233,8	12,5
21	28	3	0,985	2,65	20,1	0,0859	613	298,9	12,8
22	30	3	0,985	2,65	21,5	0,0946	588	385,9	12,9
23	32	3	0,985	2,65	22,9	0,1029	565	510,3	13,0

Результаты расчета ударного генератора с $2P=2$, $f=50$ гц,
 $\tau=2,06$ м, $l_i=6$ м, $a=2$, $\xi=0,5$

N	q	k_1	B_σ (тл)	B_z (тл)	U (кв)	$x_{уд}$ (ом)	$I_{уд}$ (ка)	j (а/мм ²)	W_H (Мдж)
1	8	1	1,23	2,65	7,2	0,0086	1839	121	13,7
2	10	1	1,23	2,65	8,9	0,0113	2064	411	19,1
3	12	1	1,23	2,65	10,7	0,0144	1904	613	20,6
4	14	1	1,23	2,65	12,6	0,0178	1733	874	21,1
5	8	1,5	1,23	2,65	7,2	0,0113	1714	111	13,2
6	10	1,5	1,23	2,65	8,9	0,0144	1677	181	16,0
7	14	1,5	1,23	2,65	12,5	0,0210	1559	397	20,3
8	16	1,5	1,23	2,65	14,3	0,0250	1469	550	21,4
9	10	2	1,23	2,65	8,9	0,0133	1403	104	13,5
10	12	2	1,23	2,65	10,7	0,0216	1340	153	15,4
11	14	2	1,23	2,65	12,6	0,0249	1345	229	17,9
12	16	2	1,23	2,65	14,3	0,0290	1306	321	19,6
13	18	2	1,23	2,65	16,1	0,0336	1249	438	20,8
14	20	2	1,23	2,65	17,9	0,0384	1189	595	21,5
15	14	2,5	1,23	2,65	12,6	0,0294	1154	147	15,5
16	16	2,5	1,23	2,65	14,3	0,0348	1104	202	16,8
17	18	2,5	1,23	2,65	16,1	0,0384	1116	288	18,9
18	20	2,5	1,23	2,65	17,9	0,0433	1084	394	20,1
19	22	2,5	1,23	2,65	19,7	0,0486	1041	536	20,9
20	14	3	1,23	2,65	12,6	0,0326	1043	106	14,1
21	16	3	1,23	2,65	14,3	0,0383	1010	147	15,5
22	18	3	1,23	2,65	16,1	0,0445	973	199	16,7
23	20	3	1,23	2,65	17,9	0,0489	973	278	18,3
24	22	3	1,23	2,65	19,7	0,0543	952	382	19,5
25	24	3	1,23	2,65	21,5	0,0602	919	526	20,1
26	18	3,5	1,23	2,65	16,1	0,0483	901	153	15,5
27	20	3,5	1,23	2,65	17,9	0,0552	870	205	16,6
28	22	3,5	1,23	2,65	19,7	0,0624	840	276	17,4
29	24	3,5	1,23	2,65	21,5	0,0665	846	394	18,9

Т а б л и ц а 3

Результаты расчета ударного генератора с $2P=2$, $f=50$ гц,
 $\tau=2,06$ м, $l_i=6$ м, $a=2$, $\xi=0,6$

N	q	k_1	B_σ (тл)	B_z (тл)	U (кв)	$x_{уд}$ (ом)	$I_{уд}$ (ка)	j (а/мм ²)	W_H (Мдж)
1	8	1	1,48	2,65	8,60	0,0069	3181	628	27,8
2	10	1	1,48	2,65	10,76	0,0095	2778	987	29,2
3	12	1	1,48	2,65	12,91	0,0120	2435	1496	28,9
4	14	1	1,48	2,65	15,06	0,0150	2079	2200	26,5
5	8	1,5	1,48	2,65	8,61	0,0090	2551	274	23,2
6	10	1,5	1,48	2,65	10,76	0,0110	2440	453	27,2
7	12	1,5	1,48	2,65	12,90	0,0140	2272	691	29,6
8	14	1,5	1,48	2,65	15,06	0,0170	2083	1011	30,6
9	6	2	1,48	2,65	6,40	0,0088	1996	77,4	13,9
10	8	2	1,48	2,65	8,60	0,0120	1920	141	17,7
11	10	2	1,48	2,65	10,76	0,0140	2049	257	23,3
12	12	2	1,48	2,65	12,90	0,0170	2000	404	26,9
13	14	2	1,48	2,65	15,00	0,0200	1900	599	29,3
14	10	2,5	1,48	2,65	10,76	0,0179	1625	154	18,7
15	12	2,5	1,48	2,65	12,91	0,0200	1725	261	23,6
16	14	2,5	1,48	2,65	15,0	0,0230	1699	396	26,7
17	16	2,5	1,48	2,65	17,2	0,0270	1632	578	28,7
18	10	3	1,48	2,65	10,8	0,0200	1460	112	16,9
19	12	3	1,48	2,65	12,9	0,0247	1411	171	19,5
20	14	3	1,48	2,65	15,1	0,0270	1489	276	23,7
21	16	3	1,48	2,65	17,2	0,0308	1469	410	26,4
22	12	3,5	1,48	2,65	12,9	0,0272	1289	130	17,9
23	14	3,5	1,48	2,65	15,1	0,0326	1246	191	20,0
24	16	3,5	1,48	2,65	17,2	0,0350	1310	301	23,8
25	18	3,5	1,48	2,65	19,4	0,0392	1295	448	26,0
26	20	3,5	1,48	2,65	21,5	0,0439	1255	668	27,4

Таблица 4

Результаты расчета ударного генератора с $2P=2$, $f=50$ гц,
 $\tau=2,06$ м, $l_i=6$ м, $a=2$, $\xi=0,7$

N	q	k_1	B_σ (тл)	B_z (тл)	U (кв)	$x_{уд}$ (ом)	$I_{уд}$ (ка)	j (а/мм ²)	W_H (Мдж)
1	4	2	1,72	2,65	4,30	0,0059	1900	80,6	14,6
2	6	2	1,72	2,65	7,53	0,0065	3096	225	24,8
3	8	2	1,72	2,65	10,04	0,0083	3184	457	33,4
4	10	2	1,72	2,65	12,50	0,0106	3011	778	38,3
5	12	2	1,72	2,65	15,00	0,0130	2743	1228	40,1
6	4	3	1,72	2,65	5,02	0,0071	1934	36	10,5
7	6	3	1,72	2,65	7,53	0,0100	2000	89	16,3
8	8	3	1,72	2,65	10,04	0,0120	2164	188	23,6
9	10	3	1,72	2,65	12,55	0,0140	2316	356	30,6
10	12	3	1,72	2,65	15,06	0,0170	2286	594	35,5
11	14	3	1,72	2,65	17,50	0,0203	2175	947	38,1

Таблица 5

Результаты расчета ударного генератора с $2P=2$, $f=50$ гц,
 $\tau=2,06$ м, $l_j=6$ м, $a=2$, $\xi=0,8$

N	q	k_1	B_σ (тл)	B_z (тл)	U (кв)	$x_{уд}$ (ом)	$I_{уд}$ (ка)	j (а/мм ²)	W_H (Мдж)
1	4	2	1,98	2,65	5,73	0,0028	5310	376	32,2
2	6	2	1,98	2,65	8,61	0,0041	5281	961	45,8
3	8	2	1,98	2,65	11,4	0,0059	4500	1805	49,4
4	10	2	1,98	2,65	14,3	0,0080	3760	3041	45,2
5	4	3	1,98	2,65	5,73	0,0057	2700	118	16,7
6	6	3	1,98	2,65	8,60	0,0058	3891	430	35,2
7	8	3	1,98	2,65	11,4	0,0075	3890	903	45,2
8	10	3	1,98	2,65	14,3	0,0097	3530	1624	48,2

Выбор отношения ширины зубца к зубцовому делению

Для турбогенераторов отношение ширины зубца к зубцовому делению, как правило, принимают в пределах 0,5—0,6. Представляет интерес установить оптимальные пределы выбора ξ и для ударного генератора. С этой целью для ряда значений индукции в воздушном зазоре, числа пазов на полюс и фазу и геометрии паза были рассчитаны зависимости энергии, отдаваемой генератором в нагрузку, и плотности тока в обмотке статора от ξ . Расчеты показывают полную идентичность зависимостей для рассмотренных вариантов. Характерные кривые представлены на рис. 1 и 2. В качестве критерия при сравнении рассматриваемых вариантов, кроме величины энергии, передаваемой в нагрузку, принимаем максимально допустимое значение плотности тока в обмотке статора. Плотность тока в существующих ударных генераторах лежит в пределах от 150 а/мм² [2] до 270 а/мм² [3]. В [16] получена зависимость нагрева обмотки статора за один импульс тока от плотности тока. Зависимость приведена ниже:

j а/мм ²	100	200	300	400	500	600	700
°С	1,1	4,4	10,0	17,8	27,8	40,0	54,5

Мы считаем возможным допустить предельное значение плотности тока в обмотке статора порядка 400 а/мм^2 .

Из таблиц и рисунков очевидно, что для любого числа пазов на полюс и фазу энергия с возрастанием ξ растет. Однако растет и плотность тока. На рис. 1 и 2 знаком (X) показаны значения энергии при плотностях тока в обмотке статора порядка 400 а/мм^2 . В пределах изменения числа пазов на полюс и фазу от $q = 20$ до $q = 6$ энергия возрастает с уменьшением q .

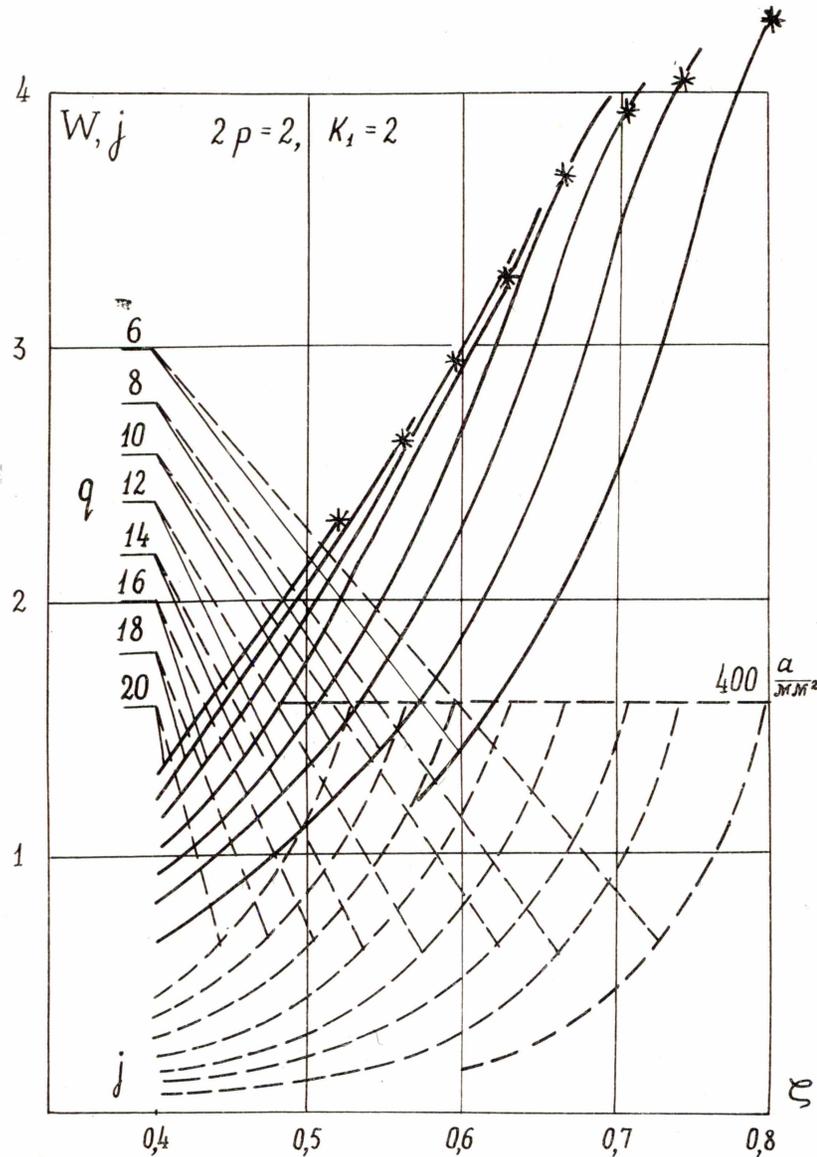


Рис. 1. Зависимости энергии /————/ и плотности тока /-----/ от ξ и q при $k_1=2$. За 1 принята энергия в 10 мдж.

Расчеты показывают, что для каждого значения числа пазов на полюс и фазу имеется какое-то предельное (по допустимой плотности тока) значение ξ , причем с увеличением отношения высоты паза к его ширине величина ξ несколько возрастает. Для меньшего числа пазов на полюс и фазу следует принимать большие значения ξ , например, при $k_1 = 2$ и $q = 20$ наибольшее допустимое отношение ширины зубца и зубцовому делению равно 0,5, для $q = 16$ $\xi = 0,55$, а для $q = 8$ $\xi = 0,8$.

Другим критерием оптимальности выбора ξ является величина индукции в воздушном зазоре машины.

В [10] указано, что рациональный предел индукции в воздушном зазоре машины равен 1,5 тл. В настоящее время фирмой СЕМ (Франция) построен и испытан модельный ударный генератор с максимальным значением индукции в воздушном зазоре машины в два тесла [15].

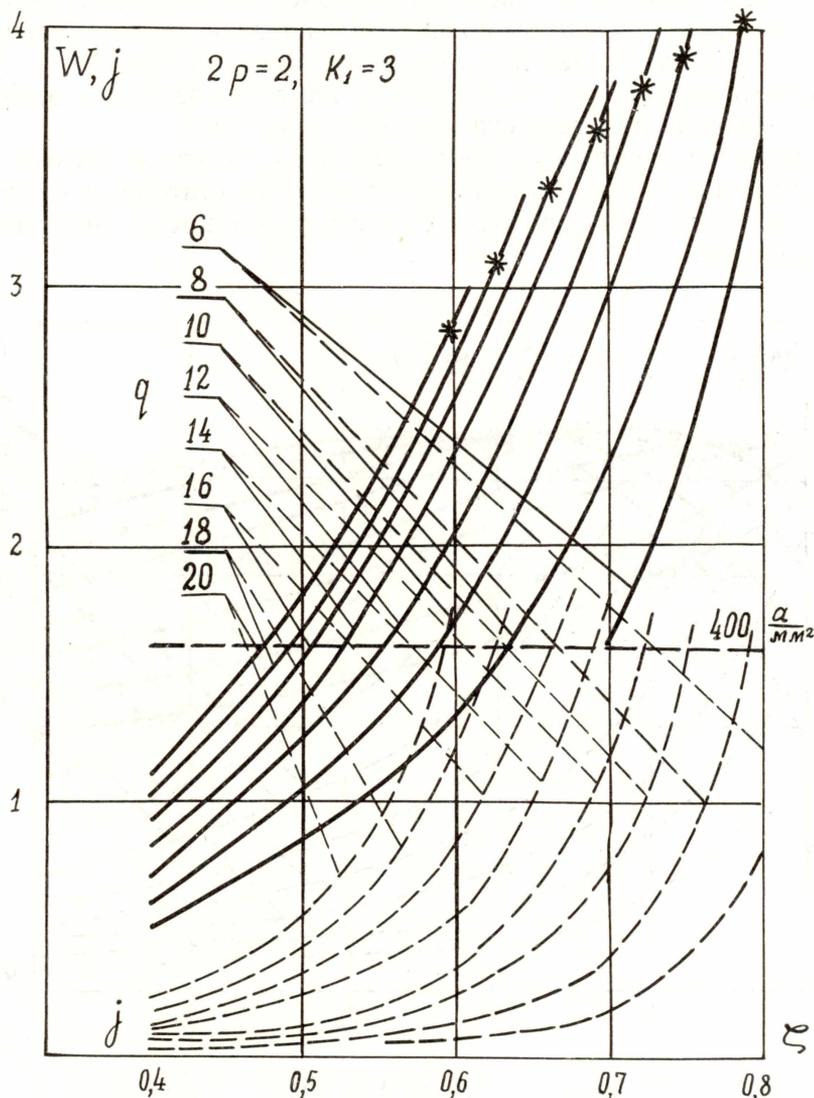


Рис. 2. Зависимости энергии /—/ и плотности тока /---/ от ξ и q при $k_1=3$. За 1 принята энергия в 10 мдж.

Принимая предельное значение индукции в зубце статора равным 2,65 тл, согласно выражению (15), получаем максимальные отношения ширины зубца к зубцовому делению:

для $B_\delta = 1,5$ тл	$\xi = 0,61,$
для $B_\delta = 1,75$ тл	$\xi = 0,71,$
для $B_\delta = 2,0$ тл	$\xi = 0,81$

Таким образом, для ударных генераторов оптимальное отношение ширины зубца к зубцовому делению лежит в пределах рекомендаций для турбогенераторов. При значительной форсировке возбуждения оптимальное значение коэффициента ξ возрастает, по сравнению с рекомендациями для турбогенераторов, и лежит в пределах $\xi = 0,6 - 0,8$, увеличиваясь с уменьшением числа пазов на полюс и фазу.

Выбор отношения высоты паза к его ширине

Для снижения индуктивного сопротивления рассеяния паза рекомендуют уменьшать высоту паза увеличивая его ширину. В предыдущем разделе нами исследован вопрос о целесообразном соотношении между шириной зубца и зубцовым шагом, откуда следует, что ширину паза статора ударного генератора нецелесообразно увеличивать более $0,5 t_z$. Иначе говоря, вопрос о снижении индуктивного сопротивления пазовой части обмотки статора полностью сводится к выбору целесообразной высоты паза. Критерием эффективности выбранного отношения k_1 является величина отдаваемой генератором энергии при допустимой плотности тока.

Очевидно, что при выбранной ширине паза снижение высоты паза ведет к увеличению активного сопротивления обмотки статора, а следовательно, к увеличению затухания свободных составляющих тока внезапного короткого замыкания.

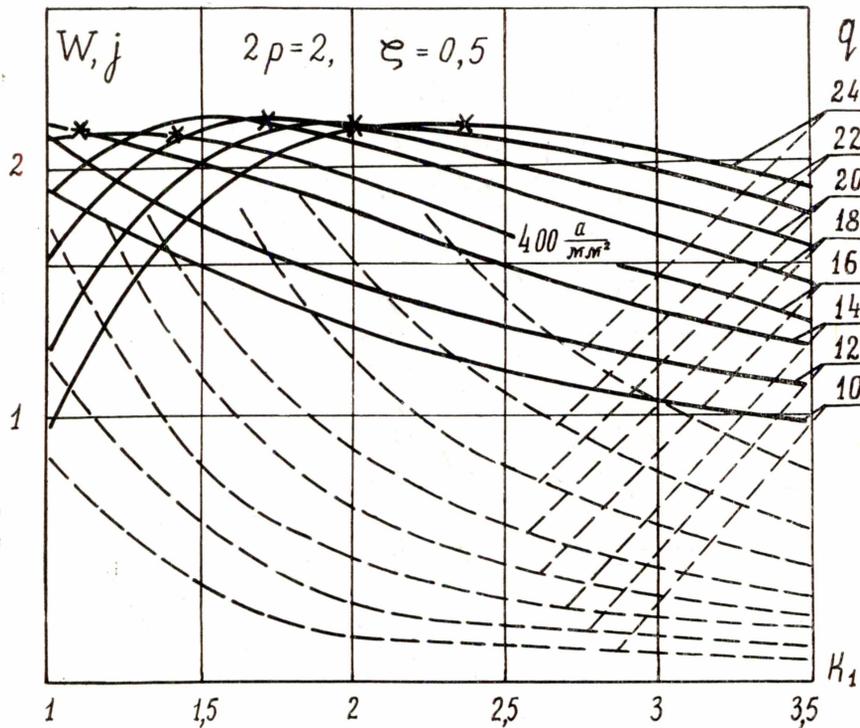


Рис. 3. Зависимости энергии /—/ и плотности тока /---/ от k_1 и q при $\xi=0,5$. За 1 принята энергия в 10 мдж и плотность тока в $500 \frac{a}{mm^2}$.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости энергии, отдаваемой генератором нагрузке от соотношения между высотой и шириной паза статора. Из рисунков очевидно, что для любого значения q уменьшение высоты паза ведет к возрастанию энергии только до определенного предела.

При этом для каждого числа пазов на полюс и фазу будут свои критические значения k_1 . Однако эти значения k_1 нельзя считать оптимальными, хотя энергия и максимальна, так как плотности тока в обмотке статора значительно выше допустимого предела. Например, при $\xi = 0,6$ для $q = 14$ энергия максимальна при $k_1 = 1,5$, но при этом плотность тока в обмотке статора выше принятой нами за предельную. Снижение плотности тока до $400 \frac{a}{mm^2}$ сопровождается уменьшением энергии всего на 2,5%. При этом коэффициент k_1 возрастает до 1,75. Для $q = 16$ энергия максимальна при $k_1 = 1,75$, но плотность тока в 1,5 раза больше допустимой. Плотности тока в $400 \frac{a}{mm^2}$ соответствует $k_1 = 2,2$, причем энергия уменьшается всего на 5%. Значения энергии, соответствующие плотности тока в $400 \frac{a}{mm^2}$

для разных q , на рис. 3 и 4 отмечены (X). Коэффициенты k_1 , соответствующие этим энергиям, можно считать оптимальными. Для каждого числа пазов на полюс и фазу имеется свое оптимальное k_1 , возрастающее с увеличением q .

Из рис. 3 и 4 очевидно, что при заданном ξ и одной и той же плотности тока можно подобрать такие значения k_1 , при которых энергия, отдаваемая генератором нагрузке, будет одинакова для разных чисел пазов на полюс и фазу.

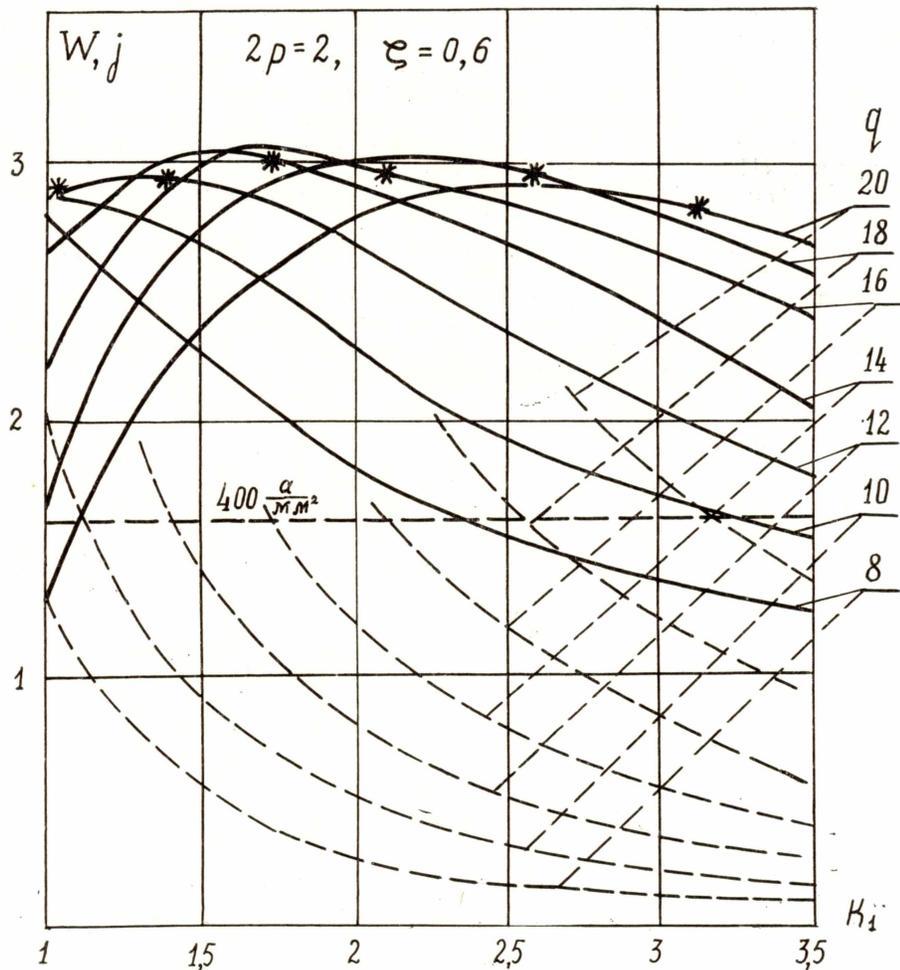


Рис. 4. Зависимость энергии /————/ и плотности тока /-----/ от k_1 и q при $\xi=0,6$. За 1 принята энергия в 10 мдж.

Например, при $\xi = 0,6$ и плотности тока $j = 400 \text{ а/мм}^2$ энергия, отдаваемая генератором нагрузке, равна 30 Мдж при

$$k_1 = 1,0 \text{ и } q = 10, \quad k_1 = 1,75 \text{ и } q = 14, \quad k_1 = 2,5 \text{ и } q = 18 \text{ и т. д.}$$

Таким образом, нами показаны наиболее целесообразные пределы изменения геометрии зубцовой зоны ударного генератора по сравнению с турбогенераторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Х а р м с. Конструкция ударных генераторов, Электрические машины специального назначения (доклады конференции в 1957 г. в г. Дуркхейме). ГЭИ, М.— Л., 1960.
2. А. И. В а ж н о в. Электрические машины, «Энергия», 1969.

3. М. П. Костенко. Электрические машины (специальная часть), ГЭИ, 1949.
4. И. К. Федченко. Техника высоких напряжений изд. «Вища школа», Киев.
5. Е. Г. Комар. Ударные генераторы завода «Электросила», ВЭП, № 1, 1940.
6. А. И. Воронцов, Г. М. Хуторецкий. Генератор разрывной мощности на 2500 Мва, Сб. «Электросила», № 20, 1961.
7. Spiess Hans «Kurzschlussgeneratoren der Maschinenfabrik Oerlikon», Brown Boveri Mitt, 1968, 55, № 12.
8. L. A. Kilgore, E. J. Hill, C. A. Flik «A new three —million — kva short — circuit generator», Tr. IEE on Power Apparatus and Systems, 1963, № 67.
9. Tittel Josef «Der neue 4300 MVA Stobleistungs — generator fur das Schaltwerk der Siemens — Schuchertwerke», Siemens — Z., 1962, 36, № 8.
10. И. М. Постников. О проектировании ударного генератора, Труды ЛПИ т. 209, 1969.
11. Л. Бобков, А. А. Чистяков. Способы снижения сверхпереходной индуктивности ударного синхронного генератора. Исследование электромагнитных полей, параметров и потерь в мощных электрических машинах. Изд. «Наука», М.—Л., 1966.
12. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. К выбору основных размеров ударного генератора, «Изв. ТПИ», том 132, 1965.
13. И. М. Постников. Проектирование электрических машин, ГИТЛ УССР, Киев, 1960.
14. В. В. Титов, Г. М. Хуторецкий и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. «Энергия», Ленинград, 1967.
15. И. Иохан, П. Ребут, А. Топосиан. Первые эксперименты на синхронных генераторах. Доклады 5-го симпозиума по термоядерному синтезу, сентябрь, 1968.
16. В. Ф. Кулаков. Вопросы повышения мощности и энергии ударного генератора, Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Томск, 1969.