

К ВЫБОРУ ОБМОТКИ РОТОРА УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, К. А. ХОРЬКОВ.

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Роторы генераторов ударной и разрывной мощности, как и роторы турбогенераторов нормального исполнения, выполняются обычно цельноковаными с неявновыраженными полюсами. Число зубцовых делений ротора, а также число пазов, заполненных обмоткой возбуждения, и распределение обмотки по пазам зависит от назначения генератора и от схемы его включения. Например, в ударном генераторе Капицы-Костенко, предназначенном для получения сверхсильных магнитных полей с постоянным значением максимальной величины поля в течение небольшого промежутка времени, обмотка возбуждения состоит из двух частей. Одна из частей обмотки имеет шаг, практически равный полюсному делению, а вторая — половине полюсного деления. Каждая часть обмотки имеет независимое питание и регулирование [1]. Аналогично устроен ротор однофазного генератора ТО-12-2, выпущенного заводом «Электросила» также для создания сверхсильных магнитных полей [2].

Общим для роторов генераторов ударной и разрывной мощности является мощная демпферная система, занимающая в некоторых генераторах до 40% площади паза ротора [3]. При этом демпферная обмотка распределяется равномерно по всей окружности ротора, в связи с этим в зоне больших зубцов ротора профрезеруются специальные пазы для демпферной обмотки.

Пазы на большом зубце под демпферную обмотку, как и основные пазы ротора, оказывают влияние на величину пульсаций магнитного потока. Это влияние в ударных генераторах значительно сильнее, чем в турбогенераторах нормального исполнения, так как воздушный зазор в генераторах ударной и разрывной мощности уменьшен примерно вдвое. Поэтому в тех случаях, когда по условиям работы генератора ставится требование, чтобы пульсации э. д. с. не превосходили заданной величины, возникает необходимость детального изучения влияния зубчатости ротора на форму кривой э. д. с. статора. В частности, такое требование является первоочередным для генераторов ударной мощности, предназначенных для работы в схемах питания ускорителей заряженных частиц. В этом случае в нарастающей части поля или тока генератора, создающего это поле, не должно быть провалов, вызванных высшими и, в том числе, зубцовыми гармоническими. В особенности

это относится к начальному участку кривой тока от нуля до значения, определяемого уровнем инжекции ускорителя.

В настоящей работе, на основании теоретических и экспериментальных исследований производится выбор числа пазовых делений ротора, числа пазов ротора, заполненных обмоткой возбуждения, и числа витков обмотки возбуждения, а так же рассматривается влияние отношения $\gamma = z_2/z_2'$ и магнитных клиньев в пазах ротора на величину высших гармонических э. д. с. и на величину сверхпереходного индуктивного сопротивления.

Выбор числа зубцовых делений ротора

В турбогенераторах нормального исполнения массив цельнокованого ротора оказывает достаточное демпфирующее действие, в связи с чем турбогенераторы выполняются обычно без специальной демпферной обмотки или, в некоторых случаях, с очень слабой демпферной обмоткой. По этой причине все известные методики расчета демпферных систем для синхронных машин относятся к машинам с явно выраженными полюсами.

В зависимости от режима и условий работы синхронной машины к демпферной обмотке предъявляются различные требования. В однофазных генераторах, например, основная задача демпферной системы состоит в демпфировании обратного поля. В этом случае демпферная обмотка должна быть спроектирована таким образом, чтобы она имела по возможности минимальное активное сопротивление, минимальные потери, хороший теплоотвод и т. д.

С целью уменьшения добавочных потерь в демпферной системе от токов зубцовой частоты рекомендуется выбирать шаг демпферной обмотки t_2 возможно ближе к зубцовому шагу статора t_1 [4]:

$$t_2 = (0,9 \div 1,2) t_1; \quad n_c = \frac{b_p - t_2}{t_2} = \text{ц. ч.},$$

где n_c — число демпферных стержней на полюс,
 b_p — ширина полюсной дуги.

В некоторых работах при выборе шага демпферной обмотки исходят из условия предотвращения появления больших амплитуд зубцовых гармонических не только первого, но и более высоких порядков с целью получения большой чистоты волны э. д. с. [5].

$$t_2 = \frac{q_1}{q_1 \pm 1} t_1, \quad (1)$$

где q_1 — число заполненных пазов на полюс и фазу. При этом для размещения достаточного числа демпферных стержней на полюс рекомендуется принимать шаг демпферной обмотки всегда меньше зубцового шага статора.

Для однофазных машин, при числе заполненных пазов статора равном $2/3$ от общего числа пазов, $q_1 = 1/3 z_1'$, тогда выражение (1) будет иметь вид

$$z_2' = \left(1 - \frac{2\delta}{D}\right) (z_1' \pm 3).$$

Приняв для генераторов ударной мощности отношение зазора δ к диаметру расточки статора D в среднем равным 0,02, получим

$$z_2' = 0,96 (z_1' \pm 3). \quad (2)$$

В табл. 1 приведены расчетные значения чисел зубцовых делений ротора z'_2 для заданного ряда чисел зубцовых делений статора z'_1 . Расчет производился по выражению (2) с округлением до ближайшего четного числа, при этом знаку „плюс“ в выражении (2) соответствует вторая строка табл. 1, знаку „минус“ — третья. Наибольшее отклонение числа зубцовых делений ротора в табл. 1 от рассчитан-

Таблица 1

	z'_1	24	30	36	42	48	54	60	66	72
1*	z'_2	26	32	38	44	50	54	60	66	72
2	z'_2	20	26	32	38	44	50	54	60	66

ных по (2) значений составляет одно зубцовое деление. Таким образом, с учетом округления, условие (2) для определения числа зубцовых делений ротора генератора ударной мощности можно представить в виде

$$z'_2 = z'_1 + (2 \div 0) \text{ и } z'_2 = z'_1 - (4 \div 6), \quad (2a)$$

при этом первые цифры в скобках в выражении (2a) относятся к числам зубцовых делений статора в диапазоне $z'_1 = 24 \div 54$, а вторые — $z'_1 = 54 \div 72$.

Если придерживаться рекомендованного для машин с явно выраженными полюсами соотношения $t_2 < t_1$, то следует принять для генератора ударной мощности

$$z'_2 = z'_1 + 2. \quad (2б)$$

Однако при таком соотношении чисел пазов статора и ротора будет иметь место одна общая зубцовая гармоническая от потоков Φ_{z1} и Φ_{z2} с частотой

$$\nu = \frac{z'_1 + z'_2}{2}.$$

Амплитуда общего зубцового потока будет равна

$$\Phi_z = \sqrt{\Phi_{z1}^2 + \Phi_{z2}^2 + 2\Phi_{z1}\Phi_{z2}\cos(\alpha - \beta)},$$

где α и β — углы сдвига фаз потоков относительно начала координат.

При включении ударного генератора на нагрузку в момент прохождения э.д.с. через нулевое значение $\alpha - \beta = 0$, тогда

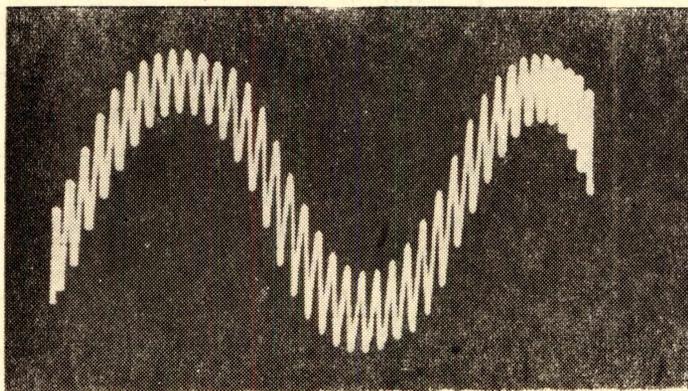
$$\Phi_z = \Phi_{z1} + \Phi_{z2}.$$

Зубцовые потоки, суммируясь алгебраически, резко ухудшают форму кривой э.д.с. катушки (рис. 1а) по сравнению с тем случаем, когда Φ_{z1} и Φ_{z2} не имеют общей гармоник (рис. 1б).

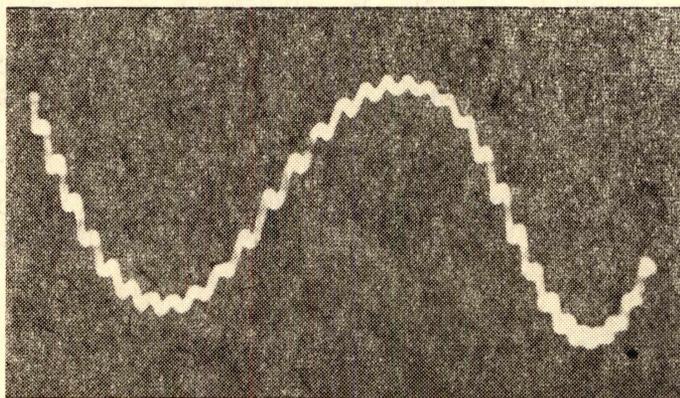
Проведенные в связи с этим теоретические и экспериментальные исследования по выявлению оптимального соотношения чисел пазов статора и ротора показали, что выражение (2), полученное для явнополюсных машин, в применении к машинам с неявно выраженными полюсами требует некоторого уточнения.

Известно, что увеличение числа пазов ротора турбогенератора приближает кривую намагничивающей силы обмотки возбуждения к синусоиде и облегчает условия охлаждения ротора. Однако в турбогенераторах, из условия механической прочности сечения основания зубца ротора, число пазов ротора обычно выбирается несколько меньшим,

чем число пазов статора. Но так как ударные генераторы, как правило, имеют меньше пазов на статоре, чем турбогенераторы тех же габаритов, то их ротор, без нарушения условия необходимой механической прочности, может иметь больше пазов, чем статор.



а



б

Рис. 1 а. Кривая э.д.с. фазы статора а) ротор и статор имеют общую зубцовую гармоническую: $z'_1=24$, $z'_2=26$, $\delta=0,5$ мм, $\gamma=0,69$; б) ротор и статор не имеют общей гармонической $z'_1=24$, $z'_2=20$, $\delta=0,5$ мм, $\gamma=0,7$.

Исследования показали, что вместо соотношения (26) для ударных генераторов целесообразно принять:

$$z'_2 = z'_1 + 4. \quad (3)$$

Если при $z'_2 = z'_1 + 2$ зубцовые гармоники статора частоты $\nu = \frac{1}{2}(z'_1 + z'_2)$ будут иметь такой же коэффициент распределения обмотки, как и основная гармоника, то при $z'_2 = z'_1 + 4$ коэффициент распределения для зубцовых гармоник ротора будет близким к нулю, то есть в последнем случае гармоники зубцовой частоты ротора не будут оказывать заметного влияния на э.д.с. статора генератора.

С другой стороны, принимая во внимание, что пазы статора ударного генератора обычно выполняются более широкими и число их соответственно меньше, чем в турбогенераторах, соотношение $z'_1 - z'_2 \geq 6$

можно сохранить только для отдельных машин с особыми требованиями в отношении формы кривой тока и для случаев, когда число пазов на статоре $z_1' \geq 54$.

Таким образом, приемлемое для большинства практических случаев соотношение между числами пазов на статоре и роторе ударного генератора будет

$$z_2' = z_1' \pm 4. \quad (4)$$

Влияние глубины пазов ротора на картину поля в зазоре

Пазы демпферной обмотки на большом зубце ротора оказывают существенное влияние на картину поля в зазоре. Глубина пазов под демпферную обмотку в ударных генераторах при равной ширине достигает 40% от глубины пазов, заполненных обмоткой возбуждения. Если допустить, что пазы на большом зубце, как и основные пазы ротора, в равной мере влияют на величину пульсаций магнитного поля в зазоре, то при этом значительно упрощается расчет проводимостей зубцового слоя ротора. В этом случае при расчете картины поля в зазоре синхронных машин с неявновыраженными полюсами можно будет применить методику, детально разработанную и исследованную применительно к асинхронным машинам [6].

Для выяснения влияния пазов большого зубца ротора на картину поля в зазоре было выполнено большое число экспериментов. В одном из них осциллографировались э. д. с. катушки с полным шагом, расположенной на статоре исследуемого генератора, имеющего $z_1 = 24$, $z_2 = 20$, $D = 104$ мм, $\delta = 0,5$ мм. В первом случае цельнокованный ротор с неявновыраженными полюсами имел открытые пазы на большом зубце, причем глубина их составляла третью часть от глубины основных пазов (рис. 2,а). Во втором случае все пазы большого зубца

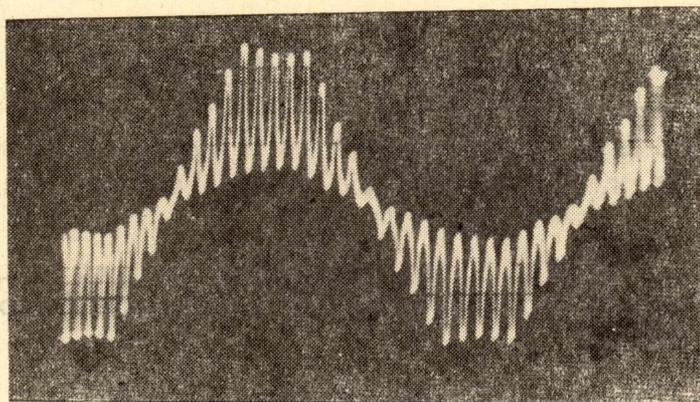


Рис. 2. Кривая э. д. с. катушки с полным шагом.
а — при открытых пазах на большом зубце ротора;

того же ротора по всему объему были забиты магнитными клиньями (рис. 2,б).

Как следует из рис. 2,а, при наличии пазов на большом зубце ротора, глубина которых меньше глубины пазов, занятых обмоткой возбуждения, пульсации э. д. с. на протяжении всей полюсной дуги являются постоянными. Следовательно, все пазы ротора ударного генератора в смысле их влияния на величину пульсаций магнитного поля в зазоре можно считать однородными. На осциллограмме (рис. 2,б),

некоторые выбросы в кривой э. д. с. в зоне большого зубца свидетельствуют о неплотной подгонке магнитных клиньев.

В другом опыте, с помощью анализатора спектра частот, замерялось содержание высших гармонических в кривой э. д. с. катушки с пол-

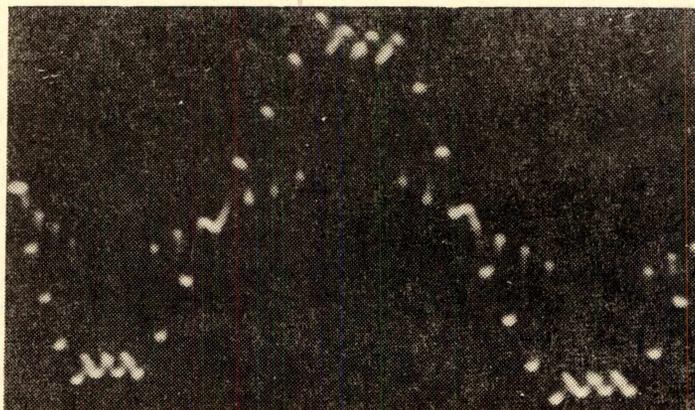


Рис. 2. σ — при закрытых пазах на большом зубце ротора,

ным шагом, расположенной на статоре исследуемого генератора. В первом случае все 22 паза цельнокованого ротора имели глубину 4,5 мм при величине зазора $\delta = 4$ мм. Результаты измерения э. д. с. высших гармонических для этой глубины паза, выраженные в процентах от э. д. с. первой гармонической даны в строке для E_1 табл. 2. Во втором случае глубина всех пазов ротора была увеличена в два раза. Процентное содержание э. д. с. высших гармонических для глубины пазов, равной 9 мм представлено в строке для E_2 табл. 2.

Таблица 2

ν	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
E_1	21,9	10,6	4,6	1,93	0,60	0,0	0,28	0,35	0,26	0,30	4,37	0,58
E_2	19,8	9,7	4,5	1,96	0,66	0,0	0,32	0,32	0,32	0,32	4,45	0,66

Как следует из табл. 2, при увеличении глубины паза в два раза содержание высших гармонических э. д. с. в катушке статора практически не изменилось.

Выбор числа заполненных пазов ротора

При выборе отношения обмотанной части ротора к его полной окружности $\gamma = z_2/z'_2$ для ударного генератора следует исходить из условий получения минимальных пульсаций поля возбуждения и минимального индуктивного сопротивления обмотки возбуждения.

Намагничивающая сила (н. с.) обмотки возбуждения неявнополюсного ротора имеет трапецеидальную форму. Разлагая кривую н. с. в ряд Фурье, можно получить выражение для любой ν -той гармонической н. с., при этом амплитуда ее будет равна

$$F_{b\nu} = \frac{8}{\pi^2} \frac{F_b}{\gamma} \frac{1}{\nu^2} \sin \nu \frac{\pi}{2} \cdot \sin \gamma \nu \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Выражение (5) можно представить в несколько ином виде:

$$F_{b\nu} = \frac{8}{\pi^2} \frac{F_b}{\nu^2} \frac{\sin \gamma \nu \frac{\pi}{2}}{\gamma \sin \nu \frac{\pi}{2}} = \frac{8}{\pi^2 \nu^2} \kappa_{p\nu} F_b, \quad (6)$$

$$\kappa_{p\nu} = \frac{\sin \gamma \nu \frac{\pi}{2}}{\gamma \sin \nu \frac{\pi}{2}}, \quad (7)$$

где $\kappa_{p\nu}$ — коэффициент распределения обмотки ротора для ν -той гармонической.

Введение коэффициента распределения для роторных обмоток облегчает задачу исследования поля ротора. По своему физическому смыслу этот коэффициент аналогичен коэффициенту распределения обмотки статора: величина коэффициента $\kappa_{p\nu}$ зависит от γ так же, как зависит от q_1 величина коэффициента распределения обмотки статора. Для обмотки ротора можно подобрать такое значение γ , при котором $\kappa_{p\nu} = 0$, то есть выбором величины γ можно добиться уничтожения любой заданной гармонической в кривой поля. Условие $\Phi_\nu = 0$ или соответственно $E_\nu = 0$ будет выполнено при $\gamma = \frac{2n}{\nu}$, где $n =$

$= 1, 2, 3 \dots$ Например, при $\gamma = 2/3$ в кривой поля не будет третьей гармонической и всех гармонических кратных трем [7].

Экспериментальное исследование кривой поля ротора проводилось на установке, в которой испытуемый генератор с числом пазов на статоре $z'_1 = 24$ при величине воздушного зазора $\delta = 0,5$ мм имел три сменных ротора неявно-полюсного типа с числом зубцовых делений $z'_2 = 20, 26$ и 28. Для получения одинаковой н.с. при разном числе заполненных пазов ротора соответствующим образом регулировался ток возбуждения.

В табл. 3 представлены результаты опыта в виде суммы высших гармонических э.д.с. катушки с полным шагом, выраженной в процентах от э.д.с. основной гармонической. Как следует из табл. 3, сумма высших гармонических э.д.с. катушки статора от третьей гармонической до уровня, определяемого нижним пределом подзубцовой

частоты $\sum_{\nu=3}^{15} E_\nu$, для всех чисел зубцов ротора имеет одинаковый вид

Таблица 3

	$z'_2 = 20$				$z'_2 = 26$				$z'_2 = 28$				
γ	0,3	0,5	0,7	0,23	0,38	0,54	0,69	0,95	1,0	0,28	0,43	0,57	0,71
$\sum_{\nu=3}^{15} E_\nu$	29,4	13,1	5,6	34,2	21,6	9,8	5,1	7,7	9,8	30	18,4	9,3	5,1
$\sum_{\nu=3}^{31} E_\nu$	56,4	51,4	48,6	57,5	53,5	52,0	51,5	51,5	52,5	59	53,5	52	51

и достигает минимального значения при $\gamma = 0,67$. Сумма высших гармонических э.д.с. катушки от третьей гармонической до уровня, определяемого верхним пределом подзубцовой частоты $\sum_{\nu=3}^{31} E_{\nu}$, для различных чисел зубцов ротора имеет менее ярко выраженную зависимость от γ , причем значения γ , при которых эта сумма имеет минимальную величину, находятся в пределах от 0,4 до 0,8.

Для высших гармонических э.д.с. фазы статора зависимость от числа заполненных пазов ротора получается иной, чем для отдельных катушек, так как в этом случае высшие гармонические катушек, составляющих фазу, складываются геометрически.

Таблица 4

	$z'_2 = 20$				$z'_2 = 26$					$z'_2 = 28$			
γ	0,3	0,5	0,7	0,23	0,38	0,54	0,69	0,85	1,0	0,28	0,43	0,57	0,71
$\sum_{\nu=3}^{15} E_{\nu}$	2,0	0,9	0,9	2,2	0,7	1,0	1,0	0,8	1,2	1,8	0,8	1,2	0,8
$\sum_{\nu=3}^{31} E_{\nu}$	9,6	8,2	7,8	42,8	41,6	41,5	41,2	41,2	41,3	14,2	10,1	7,6	6,9

В табл. 4 представлены результаты опытных данных в виде суммы высших гармонических э.д.с. фазы, выраженной в процентах от э.д.с. основной гармонической, в зависимости от числа заполненных пазов ротора. Из табл. 4 следует, что содержание высших гармонических в кривой э.д.с. фазы слабо зависит от числа заполненных пазов ротора, но сильно зависит от соотношения чисел пазов статора и ротора. В случае, когда пазы статора и ротора имеют общую гармоническую, то есть при $z'_2 = z'_1 \pm 2$ содержание высших гармонических в кривой э.д.с. фазы статора достигает максимальной величины. Таким образом, опыт подтверждает, что число пазов ротора генератора ударной мощности следует выбирать по выражению (4), а не по (1).

Хотя величина γ практически не сказывается на величине пульсаций э.д.с. фазы статора, однако имеет смысл найти оптимальное значение γ из условия получения минимальных пульсационных потерь от высших гармонических поля в воздушном зазоре машины. Как следует из табл. 3, такое значение γ будет около 0,7. Например, при $z'_2 = 28$ и $\delta = 0,5$ мм величина пульсационных потерь за счет высших гармонических при $\gamma = 0,71$ будет в 3,4 раза меньше, чем при $\gamma = 0,57$, и в 34 раза меньше, чем при $\gamma = 0,28$. Аналогичная картина получается для других значений z'_2 .

Оптимальное значение γ из условия получения минимальной величины сверхпереходного реактивного сопротивления зависит от относительной площади пазов ротора s [8]. Для относительной площади

$$s = \frac{z'_2 h_{\pi} b_{\pi}}{\frac{\pi}{4} D_p^2},$$

изменяющейся в пределах $s = 0,18-0,30$, при относительной глубине паза $\beta = h_{\pi}/D_p = 0,14$ оптимальные значения γ соответственно равны 0,7 и 0,6.

Выбор числа витков обмотки возбуждения при выбранных значениях γ и числа пазов ротора z_2' производится так же, как и для турбогенераторов нормального исполнения. Активное и реактивное сопротивление обмотки ротора, приведенные к обмотке статора, не зависят ни от числа витков обмотки ротора, ни от плотности тока в ней, а зависят только от объема меди в пазу. В связи с этим размеры меди обмотки возбуждения определяются технологическими соображениями, а число витков—приемлемой величиной тока возбуждения.

Влияние магнитных клиньев в пазах ротора на картину поля в зазоре

Влияние магнитных клиньев в пазах ротора, в частности в пазах большого зубца ротора, на величину пульсаций магнитного потока в зазоре исследовалось для двух роторов с $z_2' = 20$ и 22.

В табл. 5 представлены результаты измерения высших гармонических э. д. с. катушки и фазы статора генератора, ротор которого имел 20 зубцовых делений при $\gamma_2' = 0,7$ причем, в одном случае пазы большого зубца ротора были открытыми, а в другом — забиты магнитными клиньями по всему объему.

Таблица 5

	$\sum_{\nu=3}^{15} E_{\nu}$	17	19	21	23	25	27	29	31	$\sum_{\nu=3}^{31} E_{\nu}$	Примечание
Катушка	5,70	2,40	37,5	30,0	2,10	1,30	1,10	0,50	0,45	48,5	без клин.
	15,80	8,25	15,4	8,0	7,15	3,30	0,74	2,05	1,98	26,3	с клин.
Фаза	0,92	0,30	7,4	0,3	1,73	0,81	0,00	0,10	0,10	7,7	без клин.
	0,83	1,00	3,0	0,3	6,40	3,30	0,00	0,20	0,10	7,9	с клин.

Таблица 6

	$\sum_{\nu=3}^{15} E_{\nu}$	17	19	21	23	25	27	29	$\sum_{\nu=3}^{29} E_{\nu}$	Примечание
Катушка	29,5	1,18	1,58	2,77	41,0	6,86	6,34	5,17	51,6	$\alpha = 0$
Фаза	2,04	0,61	1,20	1,30	38,0	6,41	1,36	1,10	38,5	
Катушка	17,7	2,77	7,16	11,8	17,2	6,80	6,65	4,00	30,2	$\alpha = 0,35$
Фаза	2,34	0,65	1,48	1,50	16,0	6,60	1,20	1,00	17,6	
Катушка	15,2	4,92	2,10	11,6	11,5	6,90	3,50	5,50	24,8	$\alpha = 0,52$
Фаза	1,21	0,80	0,75	1,40	11,1	6,90	1,00	1,40	13,4	
Катушка	38,3	6,30	5,30	2,60	0,70	2,94	1,17	0,97	39,5	$\alpha = 0,87$
Фаза	2,40	0,82	0,88	0,00	0,50	2,94	0,40	0,43	4,05	

Как следует из результатов экспериментального исследования, магнитные клинья в пазах больших зубцов ротора примерно в два раза снижают величину пульсаций магнитного поля в воздушном зазоре (табл. 5), что существенно уменьшает поверхностные и пульсационные потери в зубцах статора. Однако при этом содержание зубцовых гармонических э. д. с. в фазе статора практически остается постоянным, так как, при снижении э. д. с. от зубцовых потоков ротора, э. д. с. от зубцовых потоков статора возрастает примерно в такой же мере.

В табл. 6 представлены результаты измерения тех же величин, что и в табл. 5, но для ротора, имеющего $z_2' = 22$, с обмоткой возбуждения, расположенной в двух больших диаметральных пазах. В этом случае симметрично расположенные пазы ротора последовательно забивались магнитными клиньями, при этом измерения э. д. с. производились для различных значений α , равных отношению дуги окружности, имеющей закрытые пазы, к полной окружности ротора.

Характер изменения третьей, пятой и других гармонических э. д. с. виден из рис. 3, а характер изменения зубцовых гармонических э. д. с. до уровня, определяемого нижним пределом подзубцовой частоты в зависимости от α , виден из табл. 6.

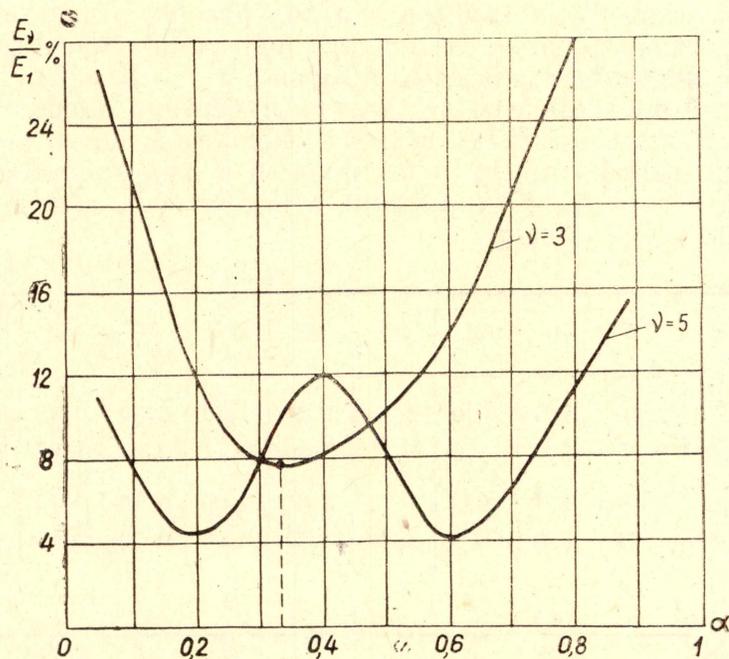


Рис. 3. Характер изменения 3 и 5 гармонических э. д. с. катушки в зависимости от α .

Как следует из табл. 6, закрытие всех пазов магнитными клиньями приводит к резкому снижению содержания высших гармонических в кривой э. д. с. фазы статора и к небольшому снижению высших гармонических в кривой поля. Последнее объясняется тем, что при этом, с одной стороны, высшие гармонические, связанные с зубчатостью ротора, уменьшаются, а, с другой стороны, высшие гармонические, от третьей до пятнадцатой, связанные с распределением обмотки ротора по пазам, возрастают за счет увеличения проводимости воздушного зазора.

Кроме того, для ротора с $z_2' = 20$ при $\gamma = 0,7$ и $\delta = 1,5$ мм были проведены измерения высших гармонических э. д. с. катушки и фазы статора, при этом в первом случае все пазы ротора были открытыми, а во втором случае все пазы были забиты составными медно-стальными клиньями. Каждая из составных частей клина занимала по половине ширины паза. Характер изменения высших гармонических представлен в табл. 7, откуда следует, что зубцовые гармонические в кривой поля ротора при этом уменьшаются в 2—3 раза, а в кривой э. д. с. фазы статора в 1,5—2 раза.

Таблица 7

	$\sum_{\nu=3}^{15} E_{\nu}$	17	19	21	23	25	27	$\sum_{\nu=3}^{27} E_{\nu}$	Примечание
Катушка	3,60	1,00	20,0	15,5	0,80	0,40	0,25	25,5	без клин.
Фаза	0,83	0,10	3,95	0,10	0,10	0,10	0,00	4,05	
Катушка	3,95	0,40	10,5	5,10	0,50	0,35	0,25	12,5	с клин.
Фаза	0,61	0,05	2,50	0,05	0,15	0,10	0,00	2,55	

Учитывая тот факт, что уже при сравнительно небольших зазорах (в рассматриваемом случае $\delta/D = 0,014$) зубцовые гармонические значительно превосходят сумму всех остальных гармонических, такое снижение зубцовых гармонических можно считать приемлемым, так как при этом не происходит существенного повышения реактивного сопротивления рассеяния.

Выводы

1. Для ударных генераторов целесообразно принимать число пазов ротора, отличающимся от числа пазов статора на четыре зубцовых деления.

2. Число заполненных пазов ротора, из условий минимальных пульсаций потока в зазоре и минимальной величины индуктивного сопротивления обмотки возбуждения, следует принимать близким к 2/3 от полного числа пазов ротора.

3. С целью уменьшения содержания высших, в том числе зубцовых, гармонических в кривой э. д. с. фазы статора следует применять для закрытия пазов ротора составные клинья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kapitz a P. L. Proc. Roy. Soc. Vol., 115, 1927, 105, 19.
2. Е. Г. Комар. ВЭП. № 1, 1940.
3. Techniscki Rusdschok, 1954, № 52.
4. Я. Б. Данилевич, Ю. А. Кулик. Теория и расчет демпферных обмоток синхронных машин. Издательство АН СССР, 1962.
5. П. М. Ипатов. ВЭП. № 7, 1953, Электричество, № 3, 1957.
6. А. И. Вольдек. Электричество. № 12, 1951, Труды ЛПИ, № 3, 1953.
7. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. Межвузовский сб. трудов, вып. 3, Вопросы теории и проектирование электрических машин, Новосибирск, 1963.
8. Г. М. Хуторецкий. Проектирование и расчет современных двухполюсных турбогенераторов. Л., 1962.