

К ВЫБОРУ ОБМОТКИ СТАТОРА УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, К. А. ХОРЬКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Обмотки статоров генераторов разрывной и ударной мощности имеют ряд особенностей, отличающих их от обмоток нормальных турбогенераторов. Эти особенности вызваны требованиями получения максимальной величины тока короткого замыкания и ограниченной скорости его затухания. Для выполнения этих требований необходимо, чтобы генераторы разрывной и ударной мощности имели по возможности минимальное число витков на статоре и максимальный поток, чтобы поток рассеяния лобовых частей был минимальным и, кроме того, необходимо располагать обмотки статора и ротора ближе к воздушному зазору и выполнять усиленную демпферную систему [1, 2]. Поэтому проектирование обмоток статора генераторов разрывной и ударной мощности представляет сложную и ответственную задачу.

К настоящему времени генераторы разрывной мощности получили широкое применение в лабораториях разрывных мощностей многих стран мира, поэтому вопросы их проектирования разработаны значительно полнее, чем для генераторов ударной мощности. Это, в частности, относится к выбору типа обмотки статора. Если для генераторов разрывной мощности, являющихся трехфазными машинами, выбор типа обмотки не является новой задачей, то для генераторов ударной мощности, являющихся преимущественно однофазными машинами, эта задача требует своего дальнейшего изучения и решения. При этом задача осложняется разнообразием требований, предъявляемых к форме кривой тока генератора ударной мощности в зависимости от области его применения.

В настоящей работе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования с помощью счетно-решающей машины Минск-1, по выбору типа обмотки статора, числа полных и заполненных обмоткой пазов статора ударного генератора, предназначенного для получения магнитных полей с большой энергией, в частности для работы в схемах питания ускорителей заряженных частиц.

Выбор типа обмотки статора

В зависимости от требований, предъявляемых к форме кривой и величине э. д. с. генератора, а также из условий рационального исполь-

зования активных материалов и т. д. выбирается тот или иной тип обмотки статора. В принципе для генератора ударной мощности могут быть применены как однослойные однофазные обмотки, так и трехфазные двухслойные обмотки с полным или укороченным шагом, при этом во время работы используются только две фазы, а третья фаза остается резервной. Устранение резервной фазы, хотя и дает экономию меди, является нецелесообразным, так как приводит к значительным усложнениям крепления лобовых частей генератора.

Однослойные обмотки, являясь более экономичными по расходу меди и изоляции из-за отсутствия резервной фазы и междуслойной изоляции, становятся особенно выгодными в тех случаях, когда по условиям допустимого напряжения на зажимах генератора приходится укладывать в каждом пазу только по одному эффективному проводнику.

Так как трехфазные двухслойные обмотки достаточно хорошо изучены, то настоящие исследования будут относиться в основном к однослойным однофазным обмоткам.

Многие вопросы проектирования и применения однофазных однослойных обмоток электрических машин до настоящего времени вызывают разногласия. Например, различными авторами по-разному трактуется вопрос о высших гармонических в кривой э. д. с. генератора, имеющего однофазную однослойную обмотку. Одни безоговорочно считают, что укорочение обмотки в одинаковой мере влияет на величину высших гармонических как для двухслойных, так и для однослойных обмоток и на этом основании делают вывод относительно уменьшения высших гармонических с укорочением шага обмотки и улучшения эксплуатационных свойств однофазной однослойной обмотки [3]. Другие считают, что сокращение шага однослойной обмотки может привести лишь к увеличению содержания высших гармонических в кривой э. д. с. и что поэтому нельзя механически переносить правила, существующие для двухслойных обмоток, на однослойные обмотки; по их мнению, укорочение шага однослойных обмоток нецелесообразно [4].

Нами исследовалось влияние укорочения шага однофазной однослойной обмотки на форму кривой э. д. с. для обмоток двух типов: эвольвентной, с равной шириной секций и концентрической подразделенной. Эксперимент проводился на установке, описанной ранее [5],

Таблица 1

Тип обмотки	$\frac{y}{u}$	3	5	7	19	21	23	25	27	29	ΣE_v
Эвольвентная равносекционная обмотка	1,000	0,30	0,46	0,25	0,10	0,00	0,60	2,98	0,20	0,00	3,12
	0,915	0,30	0,38	0,11	0,10	0,00	0,59	3,00	0,20	0,00	3,11
	0,835	0,30	0,06	0,06	0,00	0,00	0,60	3,05	0,20	0,00	3,13
	0,750	0,30	0,14	0,23	0,00	0,00	0,54	3,05	0,20	0,00	3,14
	0,667	0,30	0,39	0,21	0,10	0,00	0,53	3,05	0,20	0,00	3,15
Концентрическая подразделенная обмотка	1,000	0,30	0,46	0,25	0,10	0,00	0,60	2,98	0,20	0,00	3,12
	0,915	0,74	0,62	0,10	0,10	0,10	0,56	3,00	0,36	0,00	3,23
	0,835	1,60	0,45	0,25	0,00	0,20	0,60	3,00	0,55	0,00	3,54
	0,750	2,41	0,13	0,50	0,00	0,40	0,54	3,05	0,80	0,00	4,06
	0,667	3,26	0,34	0,19	0,10	0,52	0,52	3,04	1,02	0,00	4,62

при этом исследуемый генератор имел $D=104$ мм, $Z'_1=24$, $Z'_2=26$, $\gamma=0,7$, $\delta=4$ мм.

В результате эксперимента определялся процент содержания каждой из высших гармонических в кривой э. д. с. $\frac{E_n}{E_1} \cdot 100\%$ для различных

укорочений шага обмоток. Данные эксперимента представлены в табл. 1. Так как для 9, 11, 13, 15 и 17 гармонических значения $E_n=0$, то в табл. 1 они упущены. Из табл. 1 следует, что большинство высших гармонических, а именно, все гармонические не кратные 3 изменяются по тем же законам, что и для двухслойных обмоток как для концентрической, так и для эвольвентной обмоток.

На рис. 1 представлены кривые, построенные по расчетным данным для 5 и 7 гармонических э. д. с., там же для сравнения проставлены точки, полученные в результате эксперимента:

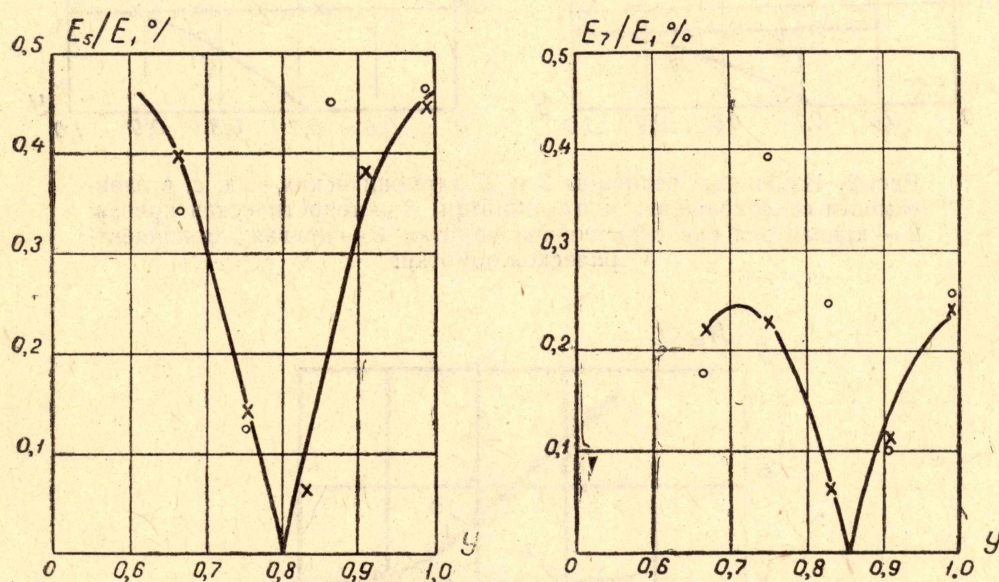


Рис. 1. Изменение величины 5 и 7 гармонических э. д. с. в зависимости от сокращения шага обмотки.

× — для равносекционной обмотки,
○ — для концентрической обмотки.

Следует заметить, что на зубцовые гармонические укорочение шага почти не сказывается, что имеет место и для двухслойной обмотки. Только гармоники кратные трем ведут себя особо: для эвольвентной обмотки они остаются постоянными и практически равными нулю, а для концентрической подразделенной обмотки они возрастают с увеличением укорочения секции (рис. 2).

На рис. 3 представлены кривые зависимости коэффициента искажения кривой э. д. с. от укорочения шага обмотки. Как следует из эксперимента, коэффициент искажения для однослойной эвольвентной обмотки в основном определяется зубцовыми гармоническими и с изменением шага обмотки практически остается постоянным. Укорочение шага концентрической обмотки ведет к резкому возрастанию гармоник кратных трем, вследствие чего искажение кривой э. д. с. растет, то есть при укорочении шага в целом форма кривой э. д. с. не улучшается, хотя отдельные гармоники и уменьшаются. Кроме того, укорочение шага

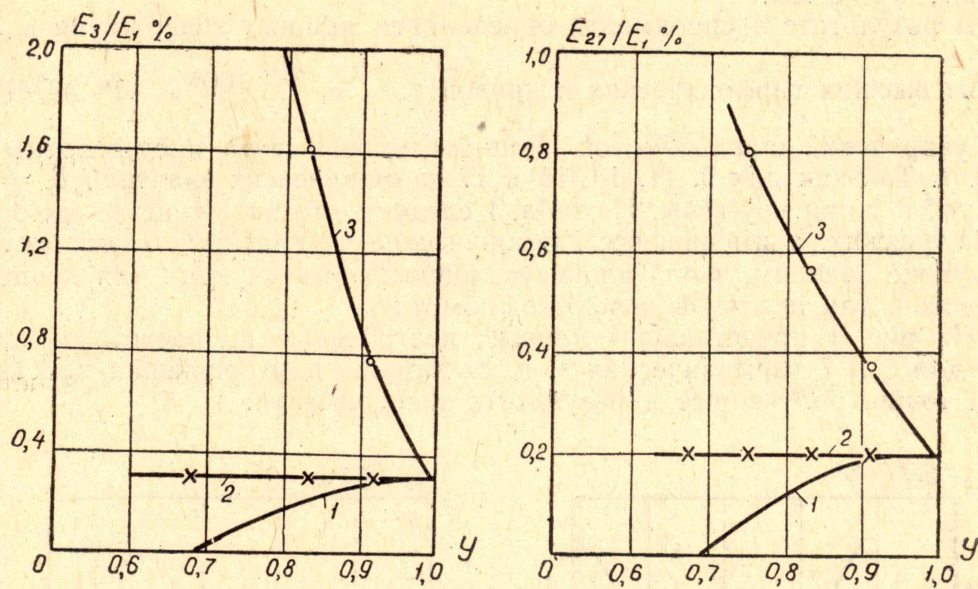


Рис. 2. Изменение величины 3 и 27 гармонических э. д. с. в зависимости от сокращения шага обмотки: 1 — теоретическая кривая; 2 — кривая для равносекционной обмотки; 3 — кривая для концентрической обмотки.

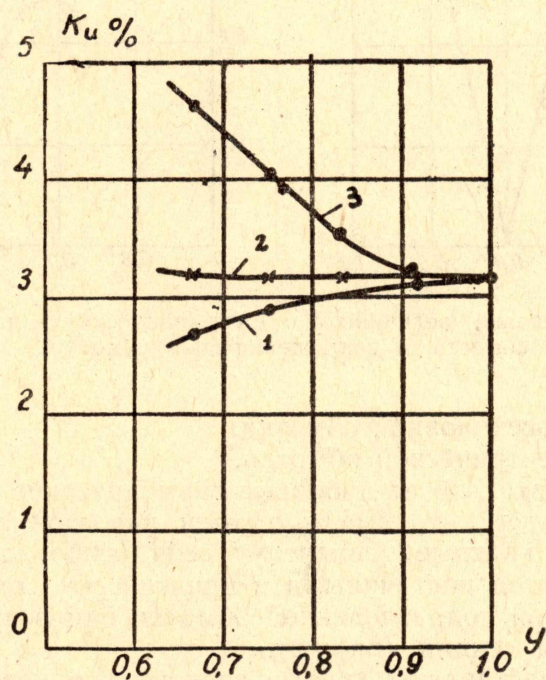


Рис. 3. Зависимость коэффициента искажения кривой э. д. с. от укорочения шага обмотки: 1 — теоретическая кривая; 2 — кривая для равносекционной обмотки; 3 — кривая для концентрической обмотки.

однослойной обмотки связано с значительным уменьшением напряжения фазы, что ведет к уменьшению мощности, а следовательно, и энергии, отдаваемой генератором в нагрузку. Отсюда следует, что укорочение шага однослойной обмотки нерационально.

С точки зрения получения максимальной ударной мощности желательно иметь минимальное ударное сопротивление генератора.

В табл. 2 приведены результаты сравнительного расчета параметров генератора, выполненного в габаритах турбогенератора на 100 Мвт с диаметром расточки статора $D=115$ см и длиной $l=420$ см. Первая строка таблицы соответствует генератору, имеющему на статоре однофазную однослойную подразделенную обмотку с полным шагом с числом пазов, заполненных обмоткой, равном $2/3$ от полного числа пазов. Во второй и третьей строках приведены данные для двух фаз генератора, имеющего на статоре трехфазную двухслойную обмотку соответственно с полным и укороченным шагом. Так как число пазов на фазу однофазной однослойной обмотки равно числу пазов на две фазы трех-

Таблица 2

№ варианта	U_n	y	w_1	a_1	Φ_1	I_n	k_{w1}	l_s	r_1	x_s	x''_d	x_2	$x_{уд}$	G_m	$G_{из}$	Q_n
1	1	1	10	1	1	1	0,823	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1	1	10	2	1	1	0,823	1,22	1,10	1,27	1,23	1,23	1,23	1,16	1,63	0,90
3	0,867	$2/3$	10	2	1	1	0,715	0,99	1,05	0,93	0,95	0,95	0,95	0,94	1,32	0,79

фазной двухслойной обмотки, то становится корректным сравнение внезапного короткого замыкания однофазного генератора с двухфазным внезапным коротким замыканием трехфазного генератора и соответственно замыкания однофазного генератора на нагрузку — с замыканием двух фаз трехфазного генератора на однофазную нагрузку. В табл. 2 приняты следующие обозначения:

- y — шаг обмотки в долях полюсного шага;
- w_1 — число последовательно соединенных витков фазы;
- a_1 — число параллельных ветвей обмотки статора;
- k_{w1} — обмоточный коэффициент;
- l_s — длина лобовой части, принятая за единицу для однофазной однослойной обмотки;
- r_1 — активное сопротивление фазы;
- $x_s, x''_d, x_2, x_{уд}$ — индуктивные сопротивления соответственно рассеяния, сверхпереходное, обратной последовательности, ударное — все они приняты за единицу для однофазной однослойной обмотки;
- $G_m, G_{из}$ — вес меди и изоляции обмотки;
- Q_n — энергия, передаваемая генератором нагрузке;
- x_n — сопротивленные нагрузки в долях $x_{уд}$.

При расчете различных вариантов изменению подвергалась только обмотка статора, в остальном генератор оставался тем же самым. Из табл. 2 следует, что как по величине энергии, отдаваемой нагрузке, так и по расходу меди и изоляции, генератор с однофазной однослойной обмоткой (строка 1) имеет преимущества перед генератором с двухслойной обмоткой с полным шагом (строка 2). Это объясняется тем, что однослойная обмотка имеет меньшие по длине лобовые части и меньшее рассеяние в зоне лобовых частей, вследствие чего уменьшает

ся индуктивное сопротивление рассеяния, а следовательно, и сопротивление $x_{уд}$. По величине энергии, отдаваемой нагрузке, однофазная однослойная обмотка имеет также преимущества перед двухслойной обмоткой с укороченным шагом (строка 3), что объясняется уменьшением напряжения из-за укорочения шага двухслойной обмотки.

Выбор числа заполненных пазов

В обычных однофазных синхронных машинах принимают число пазов статора, заполненных обмоткой, равным $2/3$ от полного числа пазов. Это диктуется стремлением исключить третью гармоническую из кривой э. д. с., а также экономическими соображениями. В табл. 3 приведены расчетные и экспериментальные данные величин высших гармонических в зависимости от отношения $\frac{q_1}{Q} = \frac{z_1}{z'_1}$ при $z'_2 = 20$, $Q = 12$, $\gamma = 0,7$, $\delta = 0,75$ мм. Минимальное искажение э. д. с. статора получается при $\frac{q_1}{Q} = 2/3$ (рис. 4). Это обусловлено тем, что при отклонении

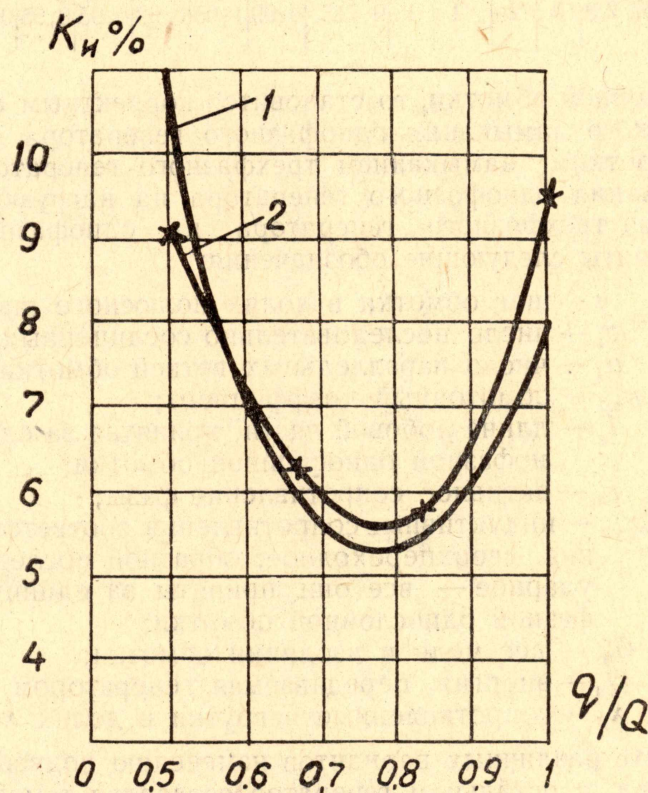


Рис. 4. Зависимость коэффициента искажения кривой э. д. с. от отношения $\frac{q_1}{Q}$: 1 — теоретическая кривая; 2 — экспериментальная кривая.

Таблица 3

γ q_1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	ΣE	Примечание
Э. д. с. секции	3,00	3,15	1,90	0,50	0,35	1,00	1,50	1,45	31,2	29,7	1,48	0,54	0,60	0,27	0,20	43,1	эксп.
Э. д. с. фазы	0,92	0,61	0,28	0,06	0,04	0,12	0,20	0,21	6,00	9,10	1,34	0,49	0,13	0,05	0,03	11,0	расчет
при $\frac{q_1}{Q} = \frac{1}{2}$	0,70	0,43	0,23	0,05	0,00	0,10	0,10	0,13	5,70	6,8	0,70	0,40	0,22	0,00	0,00	9,0	эксп.
Э. д. с. фазы	0,00	0,57	0,27	0,00	0,04	0,11	0,00	0,20	5,67	0,00	1,23	0,44	0,00	0,05	0,03	5,8	расчет
при $\frac{q_1}{Q} = \frac{2}{3}$	0,65	0,45	0,24	0,00	0,00	0,06	0,00	0,13	5,70	0,60	0,51	0,30	0,00	0,00	0,00	5,8	эксп.
Э. д. с. фазы	0,66	0,43	0,20	0,05	0,03	0,09	0,17	0,15	4,30	6,55	0,95	0,34	0,13	0,04	0,02	8,0	расчет
при $\frac{q_1}{Q} = 1$	3,04	0,40	0,26	0,00	0,00	0,10	0,10	0,10	4,53	7,54	0,89	0,20	0,10	0,00	0,00	9,3	эксп.

$\frac{q_1}{Q}$ от 2/3 третьи гармонические резко возрастают, а все прочие находятся примерно на одном уровне. В пользу отношения $\frac{q_1}{Q} = 2/3$ говорит и энергетическое рассмотрение данного вопроса (табл. 4). В табл. 4 приведены результаты расчета 3 вариантов:

- 1) $\frac{q_1}{Q} = 5/6$, 2) $\frac{q_1}{Q} = 2/3$ и $\frac{q_1}{Q} = 1/2$ при $z'_1 = 24$.

Вариант с уменьшением $\frac{q_1}{Q}$ отпадает, так как при этом значительно уменьшается энергия, передаваемая генератором в нагрузку. Вариант с $\frac{q_1}{Q} = 5/6$ может быть принят наравне с вариантом $\frac{q_1}{Q} = 2/3$, так как увеличение расхода меди компенсируется увеличением энергии генератора, а в то же время оба варианта имеют одинаковые искажения кривой э. д. с. (рис. 4).

Таблица 4

№ варианта	q_1	k_{w1}	E_1	$x_{уд}$	Q_H	G_M и $G_{из}$
1. $\frac{q_1}{Q} = \frac{5}{6}$	10	0,740	1,11	1,15	1,065	1,15
2. $\frac{q_1}{Q} = \frac{2}{3}$	8	0,825	1,00	1,00	1,000	1,00
3. $\frac{q_1}{Q} = \frac{1}{2}$	6	0,903	0,82	0,85	0,795	0,85

С выбором типа обмотки статора (однослойной или двухслойной) неразрывно связан выбор числа пазов статора z'_1 .

Выбор числа пазов статора

С целью определения оптимального числа пазов статора ударного генератора был рассчитан ряд вариантов на счетно-решающей машине Минск-1.

Расчет проводился по методике, изложенной в [6], для ряда значений наружного диаметра D_a , объема активной части машины, полного числа пазов статора z_1 и отношения высоты паза и его ширине κ_1 . Как показали расчеты, характер зависимости ударной мощности от числа полных пазов статора и от отношения высоты паза к его ширине получается одинаковым для различных значений объемов машины и внешних диаметров D_a . В табл. 5 приведены зависимости $P_{уд} = f(z_1 \kappa_1)$ для ряда значений z_1 и κ_1 при постоянной величине $D^2l = 7 \text{ м}^3$ и постоянном внешнем диаметре $D_a = 2 \text{ м}$, при этом за единицу принята мощность ударного генератора при $z_1 = 36$ и $\kappa_1 = 2$.

Из табл. 5 следует, что оптимальное число зубцов в зависимости от геометрии паза статора лежит в пределах $48 \div 60$ и что с увеличением высоты паза максимальная мощность достигается при большем числе пазов.

Таблица 5

$\kappa_1 \backslash z'_1$	24	30	36	42	48	54	60	66	72
1	0,935	1,100	1,115	1,145	1,140	1,100	1,065	1,020	0,980
2	0,765	0,900	1,000	1,100	1,165	1,210	1,205	1,190	1,150
3	0,640	0,760	0,865	0,965	1,040	1,115	1,150	1,165	1,150

Так как тип обмотки статора среди других факторов определяется числом эффективных проводников в пазу S_n , то можно связать между собой выбор числа зубцов и выбор типа обмотки. Число витков в фазе обмотки статора равно

$$w_1 = \frac{pE_1}{4,44 f \kappa_{w1} D l B_\delta}, \quad (1)$$

где B_δ — индукция в воздушном зазоре, в *тсл*;
 D и l — диаметр расточки статора и длина, в *м*.

Если принять для ударного генератора $\frac{q_1}{Q} = 2/3$, то есть $q_1 = 1/3 z'_1$

или $q_1 = \frac{w_1 a_1}{S_n}$ и подставить среднее значение обмоточного коэффициента $\kappa_{w1} = 0,82$, то уравнение (1) примет вид

$$z'_1 = \frac{165 E_1 a_1 \cdot 10^{-4}}{De B_\delta S_n}. \quad (2)$$

Так как в ударных генераторах обычно число параллельных ветвей $a_1 = 1$, то на основании уравнения (2) легко убедиться, что для машин предельных габаритов оптимальное число пазов достигается при $S_n = 1$. Это означает, что для ударных генераторов, построенных в габаритах машин предельной мощности, предпочтительнее выбирать однофазную однослойную обмотку.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Постников. Труды ЛПИ, № 2, 1937, № 209, 1960.
2. Д. Хармс. Электрические машины специального назначения. ГЭИ, 1960.
3. Müller. Deutsche Elektr., № 4, 1956.
4. Kleinrat, Franke. Deutsche Elektr., № 12, 27—30, 1956.
5. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. О высших гармонических в кривой э. д. с. ударного генератора. Вопросы теории и проектирования электрических машин. Межвузовский сборник трудов. Новосибирск, 1963.
6. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. К выбору основных размеров ударного генератора. Труды ТПИ, 1964, том 132.