

К ВЫБОРУ ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКИ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, Л. В. ЛООС

*Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники*

Ударный генератор представляет собой однофазный синхронный генератор типа турбогенератора. Нормальным режимом работы ударного генератора является внезапное включение на нагрузку в момент перехода э. д. с. генератора через нуль и отключение при первом же переходе тока через нуль. Ударный генератор, как и все однофазные синхронные генераторы, имеет демпферную обмотку по продольной и поперечной осям.

Однако назначение демпферной системы ударного генератора не ограничивается лишь демпфированием обратного поля реакции якоря, как у однофазных синхронных генераторов. Демпферная обмотка ударного генератора служит также для уменьшения сверхпереходного индуктивного сопротивления статорной обмотки. Так как демпферная обмотка ударных генераторов занимает до 40% площади паза ротора [1], то правильный выбор ее имеет важное значение.

Вопросам теории и расчета демпферных обмоток синхронных машин посвящено много работ [2], [3] и др. Однако в большинстве случаев рассматривается демпферная обмотка применительно к явнополюсным синхронным машинам.

Выбор демпферной обмотки ударного генератора в отличие от выбора ее для однофазных явно- и неявнополюсных синхронных генераторов, предназначенных для работы в продолжительном режиме, имеет ту особенность, что нормальный режим работы ударного генератора, с точки зрения установившихся понятий электротехники, является аварийным.

Характер электромагнитных процессов, происходящих при коротком замыкании или внезапном включении ударного генератора на нагрузку, индуктивность которой по своему значению близка к индуктивности рассеяния обмотки статора генератора, отображают дифференциальные уравнения, составленные для контуров статора и ротора. Исследования этих процессов по дифференциальным уравнениям находятся в соответствии с современными представлениями о переходных процессах в синхронных машинах с успокоительными контурами на роторе, т. к. в этом случае учитываются изменения потоков рассеяния между контурами [4].

Применение моделирующих устройств решает задачу максимального соответствия действительным процессам.

Исследования влияния различных параметров ударного генератора на амплитуду и на форму кривой ударного тока были проведены на математической модели электромагнитных процессов ударного генератора, созданной на базе ИПТ-5 [5].

При исследованиях за исходные принимались следующие значения параметров в относительных единицах:

$$M = 1,0; L_c = 1,05; L_b = 1,1; L_{Dd} = L_{Dq} = 1,03;$$

$$r_c = 0,005; r_b = 0,005; r_{Dd} = r_{Dq} = 0,005.$$

Где

M — взаимоиндуктивность между обмотками;

L — полные индуктивности обмоток;

r — активные сопротивления обмоток;

индексы при L и r обозначают; c — обмотка статора, b — обмотка возбуждения, Dd — демпферная обмотка по продольной оси, Dq — демпферная обмотка по поперечной оси. При этом за единицу тока в каждом случае принималась такая его величина, которая соответствовала значениям параметров, равных исходным.

ГЕНЕРАТОР БЕЗ ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКИ

Исследование однофазной синхронной машины без демпферной обмотки на роторе представляет, в основном, теоретический интерес. Эти исследования помогают более наглядно оценить роль активного сопротивления обмотки статора, индуктивности обмотки возбуждения и т. д. в получении импульса тока необходимой величины.

Дифференциальные уравнения переходных процессов для случая синхронной машины без демпферных обмоток имеют вид:

$$0 = i_1(r_1 + r_H) + (L_1 + L_H) \frac{di_1}{dt} + M \cos \omega t \frac{di_2}{dt} - i_2 \omega M \sin \omega t; \quad (1)$$

$$U_B = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \cos \omega t \frac{di_1}{dt} - i_1 \omega M \sin \omega t.$$

Система уравнений (1) не интегрируется в общем виде, численные же методы ее решения довольно трудоемки. Применение аналоговой вычислительной машины позволяет решить эту задачу.

Методика решения дифференциальных уравнений, отображающих электромагнитный переходный процесс ударного генератора, имеющего на роторе, наряду с обмоткой возбуждения, демпферную обмотку по продольной и поперечной осям, приведена в [5]. Пользуясь этой методикой, можно решить систему уравнений (1); для этого необходимо отключить от схемы решения (рис. 2) [5] усилители 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16.

В табл. 1 приведены результаты, показывающие степень влияния активного сопротивления обмотки статора на величину токов в обмотке статора и в обмотке возбуждения; при этом за единицу приняты значения токов при $\delta = \frac{r_c + r_H}{L_c + L_H} = 0$.

Таблица 1

δ	0	0,0025	0,0050	0,0075
I_c	1	0,95	0,91	0,88
I_B	1	0,96	0,92	0,89

В ударных генераторах уменьшение максимального тока статора за счет активного сопротивления будет меньше 5–9%.

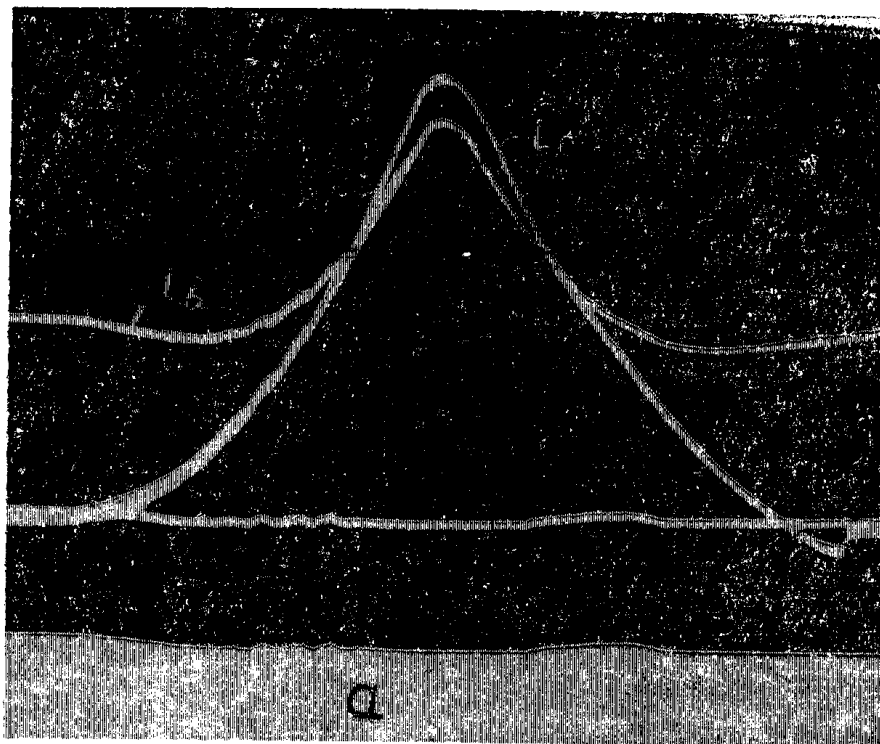
В табл. 2 приведены результаты, показывающие степень влияния индуктивности цепи ротора или в рассматриваемом случае индуктивности рассеяния обмотки возбуждения на величину токов в обмотках статора и ротора.

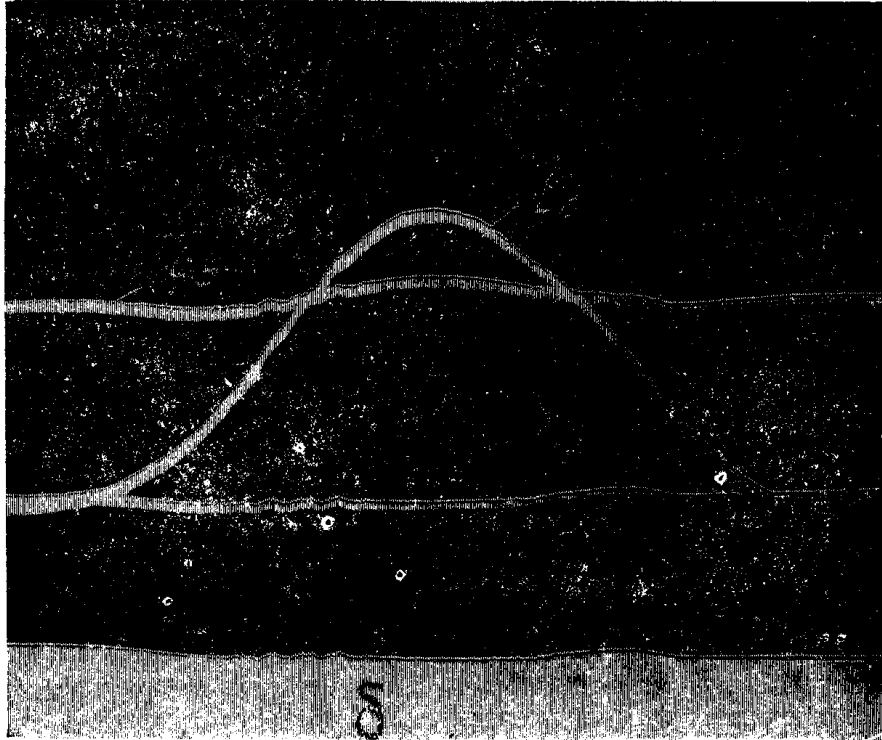
Таблица 2

L_B	1,05	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	4
I_c	1,04	1	0,92	0,87	0,83	0,79	0,66
I_B	1,05	1	0,91	0,78	0,74	0,67	0,51

С увеличением индуктивности цепи ротора амплитуды токов в обмотках статора и ротора уменьшаются, при этом ток в обмотке возбуждения приближается к постоянному, соответствующему холостому ходу. В частности, это видно из осциллограмм, приведенных на рис. 1, снятых для двух значений индуктивностей L_B при прочих неизменных параметрах, равных исходным.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что отклонение кривой тока статора от синусоиды тем больше, чем меньше общий коэффициент рассеяния, то есть чем более совершен-





Р и с. 1. Осциллограммы токов статора и ротора при отсутствии демпферной обмотки: а) $L_B = 1,05$; б) $L_B = 4,0$.

на магнитная связь между обмотками. Удельный вес высших гармонических в кривых токов статора и ротора однофазного синхронного генератора без демпферных обмоток велик.

Существует известное средство избавления от высших гармонических в кривой тока путем введения в цепь ротора дроссельной катушки. Однако такой способ не может быть рекомендован для ударного генератора, так как при этом увеличивается его сверхпереходное реактивное сопротивление.

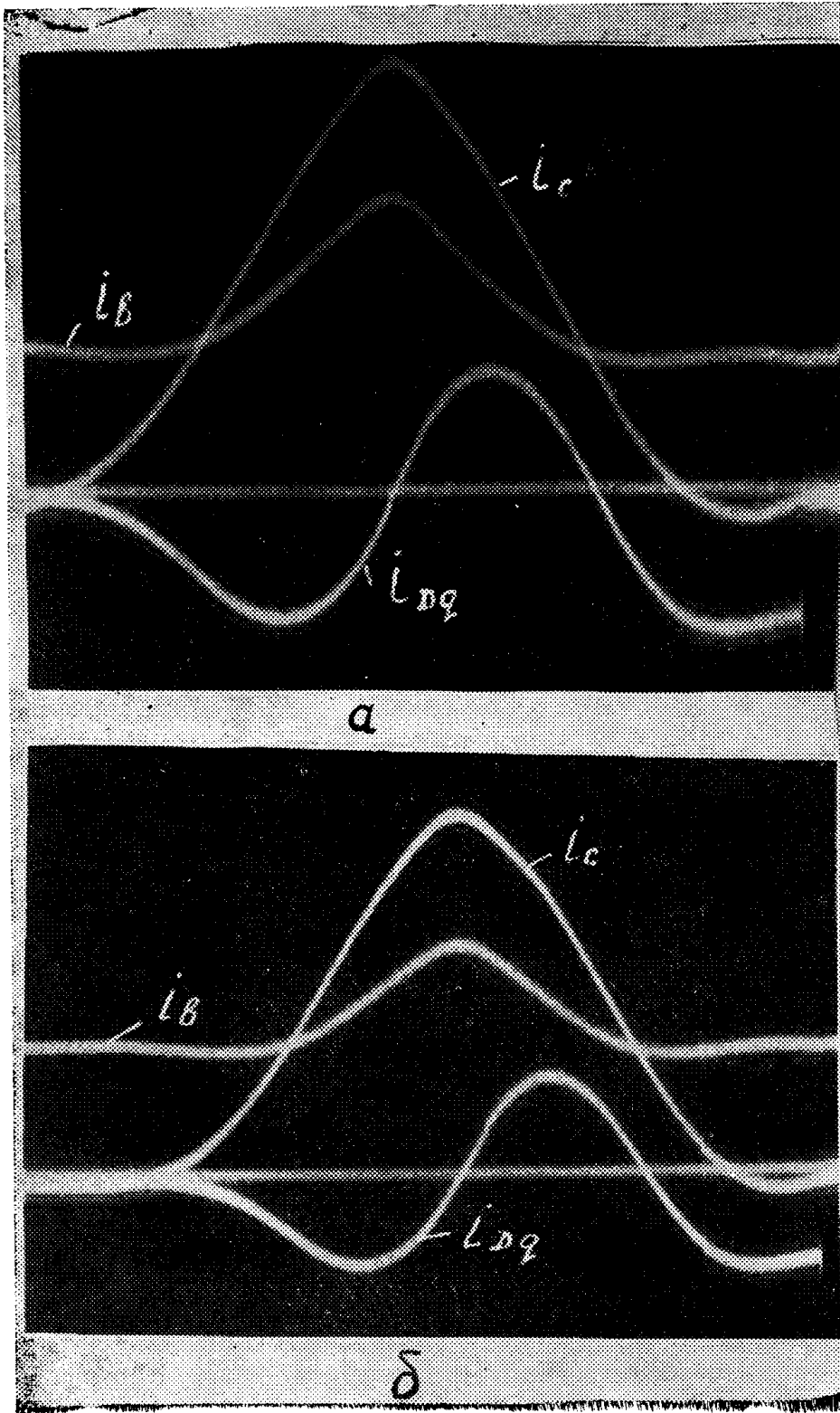
Для уничтожения высших гармонических в кривых тока необходимо создать на роторе многофазную обмотку, способную реагировать на вращающиеся относительно ротора магнитные поля вращающимися же полями.

Для лучшего выяснения возможностей демпфирования рассматривается как отдельное, так и совместное действие демпферных обмоток по продольной и поперечной осям.

ГЕНЕРАТОР С ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКОЙ ПО ПОПЕРЕЧНОЙ ОСИ

При исследовании однофазной синхронной машины с демпферной обмоткой по поперечной оси все параметры оставались постоянными, изменялась лишь индуктивность демпферной обмотки по поперечной оси в пределах:

$$L_{Dq} = 1,03 \div 1,2.$$



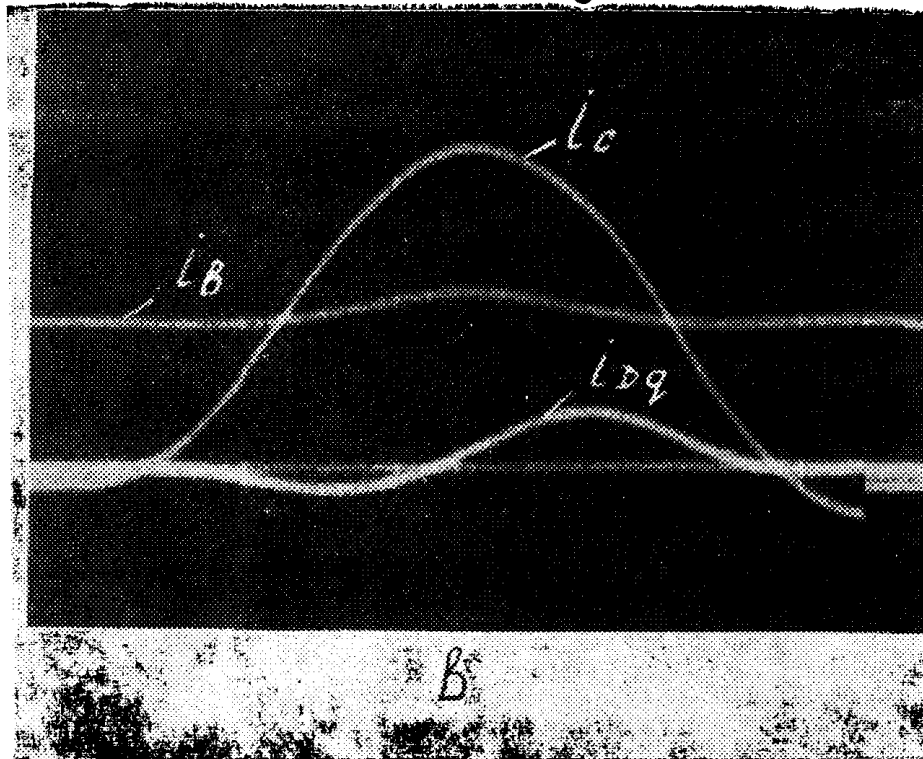


Рис. 2. Осциллограммы токов статора и ротора при наличии демпферной обмотки только по поперечной оси. а) $L_{Dq} = 1,03$; б) $L_{Dq} = 1,2$; в) $L_{Dq} = 1,3$.

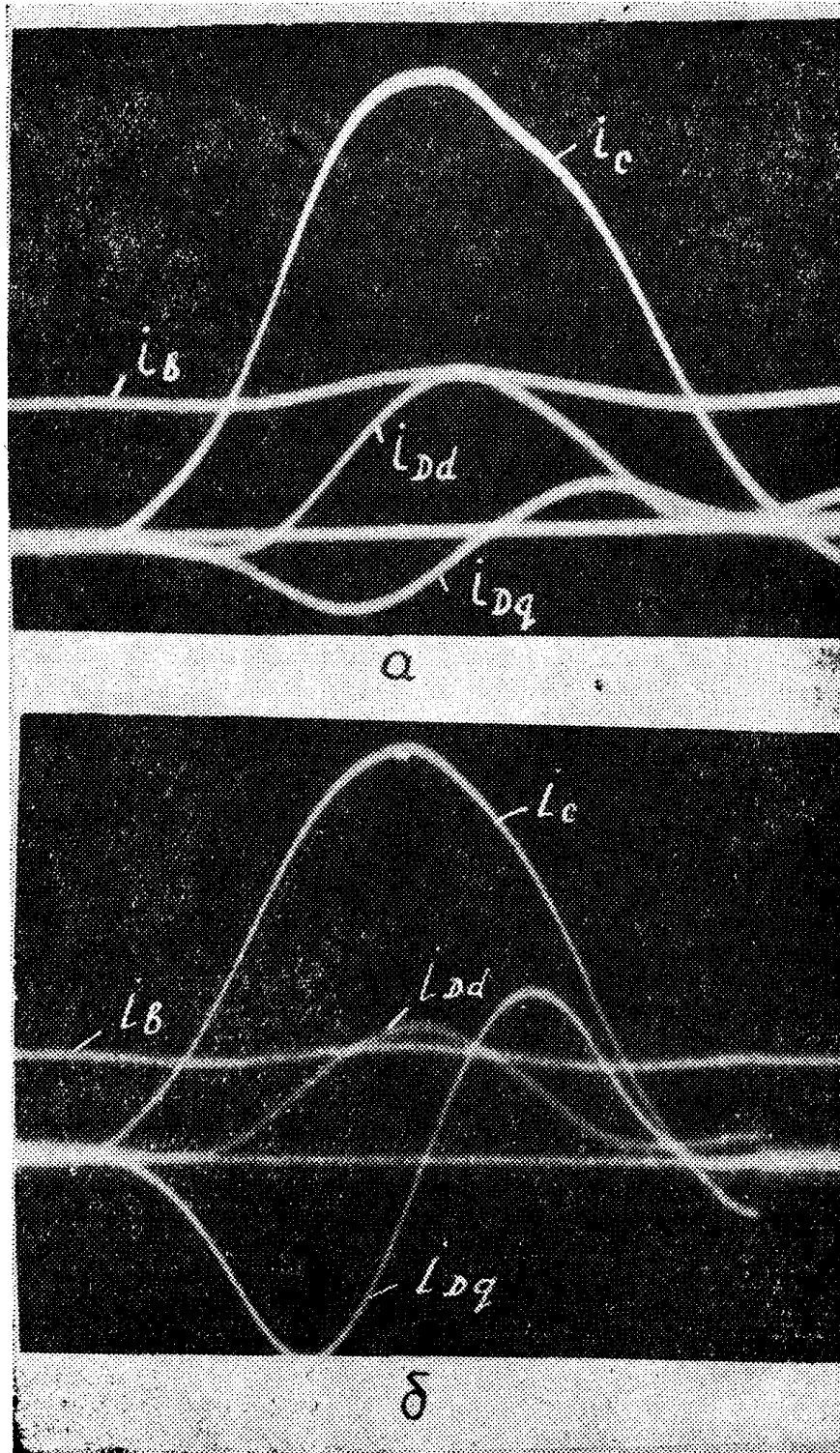
Результаты этих исследований представлены в табл. 3.

L_{Dq}	1,03	1,05	1,1	1,15	1,2
I_c	1	0,95	0,93	0,90	0,86

В результате исследований выяснено, что индуктивность демпферной обмотки по поперечной оси влияет как на амплитудное значение тока статора, так и на его форму. При малых значениях рассеяния демпферной обмотки ударный ток имеет остроугольную вершину (рис. 2а). При увеличении рассеяния демпферной обмотки вершина кривой ударного тока становится плавной (рис. 2б, 2в).

ГЕНЕРАТОР С ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКОЙ ПО ПРОДОЛЬНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ ОСЯМ

При наличии полной демпферной обмотки исследовалось раздельное влияние изменения индуктивности обмотки по продольной и поперечной осям на величину и форму тока короткого замыкания. Степень влияния индуктивности L_{Dq} на величину тока статора при наличии демпферной обмотки по продольной оси показана в табл. 3. В этом случае индуктивность демпферной обмотки по поперечной оси



Р и с. 3. Осциллограммы токов статора и ротора при наличии демпферной обмотки по продольной и поперечной осям: а) $L_{Dq} = 1,05$; б) $L_{Dq} = 1,4$.

изменялась в пределах $1,03 \div 1,4$ при всех прочих постоянных параметрах.

Таблица 4

L_{Dq}	1,03	1,05	1,1	1,15	1,2	1,4
I_c	1	0,97	0,89	0,87	0,85	0,83

Из табл. 4 следует, что демпферная обмотка по поперечной оси оказывает наиболее сильное влияние на величину тока статора в том случае, когда ее индуктивность изменяется в пределах $1 < L_{Dq} \leq L_B$. Если $L_{Dq} \geq L_B$, то дальнейшее увеличение индуктивности L_{Dq} лишь в небольшой степени влияет на величину тока.

Увеличение индуктивности L_{Dq} , как и в случае генератора без демпферной обмотки по продольной оси, приводит к сглаживанию вершины кривой ударного тока.

На рис. 3 представлена осциллограмма для двух значений индуктивностей L_{Dq} при прочих постоянных параметрах.

При исследовании влияния демпферной обмотки по продольной оси на величину ударного тока ее индуктивность изменялась в пределах $L_{Dd} = 1,03 \div 1,4$ при прочих параметрах постоянных, равных исходным. Результаты исследования представлены в табл. 5.

Таблица 5

L_{Dd}	1,03	1,05	1,1	1,2	1,4
I_c	1,0	0,90	0,82	0,74	0,63

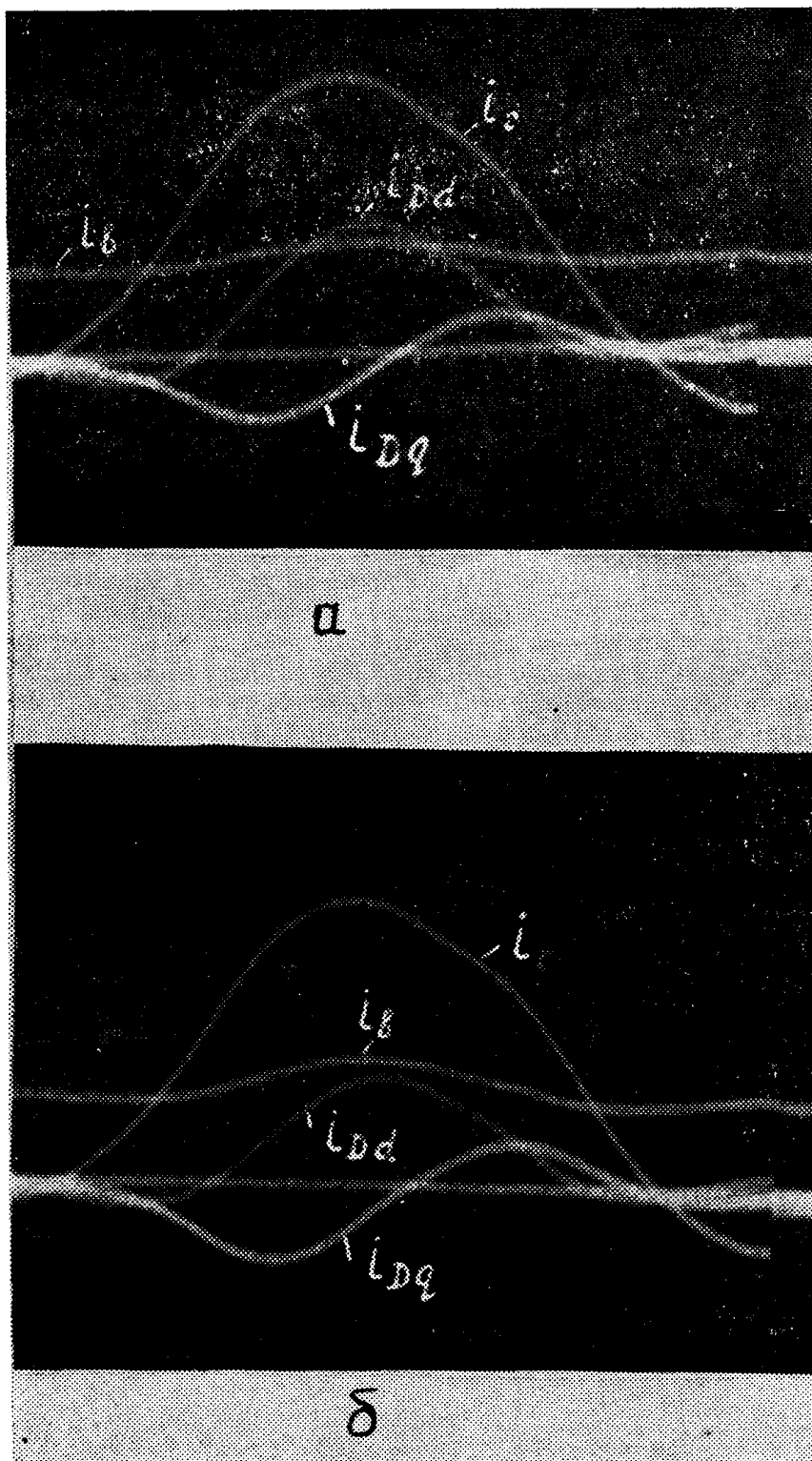
Из табл. 5 следует, что с увеличением рассеяния демпферной обмотки по продольной оси амплитуда тока статора существенно уменьшается. Поэтому, с точки зрения увеличения амплитуды тока, следует стремиться к возможно меньшим значениям индуктивности рассеяния демпферной обмотки по продольной оси. Однако, с другой стороны, уменьшение рассеяния демпферной обмотки означает уменьшение высоты меди, занимаемой этой обмоткой, что ведет к возрастанию ее активного сопротивления. При этом постоянная времени демпферной обмотки уменьшается, что приводит к заметному затуханию тока уже к концу первого полупериода э. д. с.

Для количественной оценки влияния активного сопротивления демпферной обмотки на проникновение потока реакции якоря в контур обмотки возбуждения были проведены опыты, в которых активное сопротивление изменялось в широких пределах

$$\delta = \frac{r_{Dd}}{L_{Dd}} = \frac{r_{Dq}}{L_{Dq}} = 0 \div 0,1,$$

при этом другие параметры оставались неизменными.

Из представленной на рис. 4а осциллограммы токов, снятой при $r_{Dd} = r_{Dq} = 0$, следует, что ток в обмотке возбуждения за время импульса практически не изменяется, то есть в случае, когда демпферный контур является сверхпроводящим, поток реакции якоря не проникает в обмотку возбуждения. Но если активное сопротивление демпферного контура велико, например $\delta = 0,1$, то, как это следует из приведенной на рис. 4б осциллограммы, в момент короткого замыкания ток в обмотке возбуждения сильно изменяется.



Р и с. 4. Осциллограмма токов статора и ротора при полной демпферной обмотке: а) $\delta=0$; б) $\delta=0,1$.

Максимальные значения токов в обмотке возбуждения, полученные при различных активных сопротивлениях демпферных контуров, представлены в табл. 5; при этом за единицу тока принят номинальный ток возбуждения.

Таблица 6

δ	0	0,004	0,008	0,012	0,016	0,02	0,05	0,1
I_B	1	1,02	1,05	1,07	1,08	1,10	1,15	1,6

При проектировании демпферной системы необходимо стремиться к тому, чтобы отношение между активным сопротивлением обмотки и ее индуктивностью не превосходило величины $\delta < 0,01$. Исходя из этого условия, можно выбрать размеры демпферной системы и определить долю площади паза ротора, которая занята демпферной обмоткой.

ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ

При определении влияния нагрузки на амплитудное значение ударного тока индуктивность нагрузки, выраженная в тех же относительных единицах, что и индуктивности генератора, изменялась в пределах $0 \div 0,6$ при неизменных параметрах генератора.

Так как индуктивность нагрузки прибавляется к самоиндуктивности статорной обмотки, то можно считать, что при исследованиях индуктивности статорной обмотки изменялась в пределах $1,05 \div 1,65$.

Результаты исследований представлены в табл. 6; при этом за единицу принят ток статора при $L_n = 0$.

Таблица 7

L_n	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,4	0,6
I_c	1	0,59	0,39	0,27	0,21	0,16	0,11

Таким образом с ростом индуктивности нагрузки происходит резкое уменьшение тока статора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных с помощью математической модели исследований влияния отдельных параметров на величину и характер тока короткого замыкания ударного генератора можно заключить, что для получения максимальной величины тока короткого замыкания индуктивность демпферной обмотки по продольной оси должна быть по возможности небольшой, однако, при этом необходимо стремиться к тому, чтобы уменьшение L_{Dd} не приводило к такому увеличению r_{Dd} , при котором нарушалось бы неравенство $\delta < 0,01$. С этой точки зрения в ударных генераторах целесообразно применять такую форму паза ротора, при которой часть паза, занятого демпферной обмоткой по продольной оси, имеет большую ширину, чем часть паза, занятого обмоткой возбуждения.

Демпферная обмотка по поперечной оси в меньшей степени влияет на амплитуду тока короткого замыкания. Большая амплитуда тока короткого замыкания соответствует меньшему рассеянию демп-

ферной обмотки по поперечной оси. Однако для получения более плавной формы кривой тока следует стремиться к таким значениям рассеяния демпферной обмотки по поперечной оси, при которых система обмоток ротора образует многофазную систему, близкую к симметричной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Technische Rundschau № 52, 1954. Мощные ударные генераторы США и Европы.
2. Я. Б. Д а н и л е в и ч, Ю. А. К у л и к. Теория и расчет демпферных обмоток синхронных машин, АН СССР, 1962.
3. Ю. А. К у л и к. Токи успокоительной обмотки трехфазной синхронной машины, ВЭП, № 6, 1958.
4. Л. Г. М а м и к о н я н ц. О переходных процессах в синхронных машинах с успокоительными обмотками на роторе. «Электричество», № 7, 1954.
5. А. В. Л о о с, Г. А. С и п а й л о в. Математическое моделирование электромагнитных процессов ударного генератора. Известия ТПИ, том 152, 1965.