

**УДАРНЫЙ ГЕНЕРАТОР — НАКОПИТЕЛЬ И ИСТОЧНИК  
ЭНЕРГИИ в 100 Мдж**

Г. А. СИПАЙЛОВ, К. А. ХОРЬКОВ, В. З. ХОРЬКОВА

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Периодические импульсы сильного тока применяются при питании электрофизических установок для исследования свойств веществ в сверхсильных магнитных полях, питании соленоидов установок для управляемых термоядерных реакций, питании обмоток ускорителей заряженных частиц. В качестве источников сильных импульсных токов применяются многочисленные схемы с колебательными контурами, а также специальные электрические машины.

Начало применения специальных синхронных машин в качестве источников сильных импульсных токов, получивших название ударных генераторов, положили академики П. Л. Капица и М. П. Костенко. Ими был спроектирован первый в мире генератор ударной мощности, от которого получены импульсы тока длительностью около 0,02 сек с амплитудой 72 000 а при напряжении 2,2 кв. В 1939 г. на заводе «Электросила» был изготовлен однофазный ударный генератор ТО-12-2. Этот ударный генератор позволил получать импульсы тока амплитудой 280 000 а при напряжении 2,37 кв [1, 2, 3].

Однако, несмотря на свои преимущества, ударные генераторы до сих пор не нашли широкого применения. Объясняется это, с одной стороны, несовершенством существовавшей коммутирующей аппаратуры, а с другой, традиционностью использования в качестве накопителя энергии конденсаторных батарей. Экономические расчеты показывают, что на энергии порядка 1 Мдж стоимость конденсаторной батареи и ударного генератора примерно одинаковы. С возрастанием требуемой от накопителя мощности преимущества ударного генератора становятся неоспоримы.

Физика сегодняшнего дня поставила задачу создания накопителя энергии в 100 Мдж. Над решением этой задачи работают ученые всего мира. Создавать емкостный накопитель на такие энергии в настоящее время представляется нецелесообразным. Поэтому поиски ведутся в области разработки специальных электромашинных и индуктивных накопителей [4, 5]. В течение ряда лет нами проводятся исследования специальных импульсных синхронных генераторов — генераторов ударной мощности. Всесторонние исследования позволили разработать методику оптимального проектирования этих генераторов, оценить энергетические возможности различных конструктивных исполнений ударных генераторов и разработать ряд схем передачи энергии от генератора нагрузке.

В настоящей статье приводятся результаты исследований энергетических возможностей различных конструктивных исполнений генераторов ударной мощности.

Известно, что накопление энергии во вращающихся маховых массах является наиболее эффективным. Плотность кинетической энергии роторов определяется отношением

$$\Delta T = \frac{\gamma}{16} \left( \frac{\pi D_p}{p} \right)^2 \cdot 10^4, \frac{\text{дж}}{\text{см}^3}, \quad (1)$$

где  $D_p$  — диаметр бочки ротора;  
 $p$  — число пар полюсов машины;  
 $\gamma$  — плотность материала ротора,

и достигает для двухполюсных машин с диаметром ротора 1,2 м до 69,3 дж/см<sup>3</sup>. Для сравнения следует отметить, что плотность энергии в конденсаторах составляет всего 0,02—0,26 дж/см<sup>3</sup>.

Роторы ударных генераторов предельных габаритов могут запасать энергию до 600 Мдж в двухполюсном исполнении и свыше 1000 Мдж в многополюсном [6].

Задачей конструктора является обеспечение максимальных возможностей преобразования запасаемой кинетической энергии в электромагнитную. При работе генератора ударной мощности на согласованную индуктивную нагрузку энергия, передаваемая нагрузке, определяется

$$Q_n = \frac{U_{m0}}{2\omega} I_n'' k_3, \quad (2)$$

где  $U_{m0}$  — амплитуда напряжения на зажимах однофазной обмотки статора генератора ударной мощности в режиме холостого хода;

$I_n''$  — амплитуда импульса тока;  
 $k_3$  — коэффициент затухания тока;  
 $\omega$  — угловая частота напряжения.

При постоянной величине напряжения на зажимах обмотки статора амплитуда тока, а следовательно, и доля кинетической энергии ротора, перешедшая в электромагнитную энергию обмотки статора, определяется величиной индуктивного сверхпереходного сопротивления машины. Необходимо принять всесторонние меры для снижения этого сопротивления. Прежде всего генератор должен иметь на роторе мощную демферную систему. Это снижает индуктивное сверхпереходное сопротивление до величины индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора. Последнее можно уменьшить экранированием лобовых частей обмотки статора токопроводящими капками и уменьшением высоты паза статора при одновременном увеличении его ширины.

Предельные габариты ударного генератора определяются допустимой величиной внешнего диаметра ротора, который, с одной стороны, ограничивается допустимой нагрузкой бандажных колец, а с другой — допустимыми деформациями поковки ротора. Ряд фирм изготавливает роторы турбогенераторов сборными из нескольких частей, напрессованными на центральный вал. Для сверхмощных генераторов разрабатывается технология сварного ротора. Расчет предельных диаметров бандажных колец  $D_6$ , бочки ротора  $D_p$  и предельных длин активной части роторов, выполненный специалистами фирмы «Броун-Бовери» [7], показал, что при скорости вращения ротора 3000 об/мин реально выполнимы роторы с  $D_6 = 1310$  мм,  $D_p = 1280$  мм,  $l_1 = 11000$  мм и при  $n = 1500$  об/мин:  $D_6 = 2370$  мм,  $D_p = 2250$  мм,  $l_1 = 11900$  мм.

От генераторов ударной мощности, выполненных в приведенных выше габаритах, возможно передать согласованной индуктивной нагрузке за один импульс тока энергию соответственно 60 и 100 Мдж. Еще большую электромагнитную энергию можно получить от 8-полюсного ударного генератора в габаритах  $D_p = 3900$  мм,  $l_1 = 12000$  мм, а именно 140 Мдж. Кроме возможности увеличения электромагнитной энергии в одном импульсе за счет увеличения габаритов генератора имеется возможность увеличения энергии за счет уменьшения индуктивного сопротивления обмотки статора и увеличения индукции в воздушном зазоре машины. Последнее приводит к созданию ударного генератора с гладким якорем.

Расчеты показывают, что от ударного генератора с гладким якорем (беззубцовым статором) в габаритах  $D_p = 1250$  мм,  $l_1 = 6000$  мм возможно получение энергии до 100 Мдж, что в три раза больше, чем от ударного генератора с зубчатым статором в одних габаритах. Повышение индукции в воздушном зазоре ударного генератора с гладким якорем до 2,4 тл позволяет достичь значения энергии, отдаваемой генератором нагрузке, до 200 Мдж.

При непосредственном включении ударного генератора на индуктивную нагрузку в лучшем случае нагрузке передается энергия, равная

Таблица 1

$L_n/L_r$	1	2,5	5	7,5
$m$	1	2	4	6
$Q_n, \text{мдж}$	108	188	375	564
$Q_c/Q_n \%$	7,5	5,5	2,2	1,4

четвертой части электромагнитной энергии внезапного короткого замыкания. Для увеличения доли энергии, передаваемой в индуктивную нагрузку за время одного полупериода э. д. с., нами предложена и исследована схема совместной работы ударного генератора и конденсаторной батареи [9]. Долю энергии, пере-

даваемой нагрузке, можно увеличить в три и более раз, применяя предварительную зарядку конденсаторной батареи. При этом емкость должна быть рассчитана на 25—30% энергии, передаваемой в нагрузку.

Большее значение имеет схема ускоренного накопления энергии в индуктивной нагрузке, состоящая из ударного генератора, емкостной батареи, коммутирующего устройства и нагрузки, [8]. Индуктивность нагрузки принимается в несколько раз больше, чем индуктивность генератора. Это позволяет при достижении в цепи генератор — нагрузка тех же токов, что и при согласованной нагрузке, в течение нескольких периодов накопления передать нагрузке практически весь запас электромагнитной энергии ротора ударного генератора, то есть передать нагрузке энергию в несколько сотен мдж. В табл. 1 приведены значения индуктивности нагрузки  $L_n$  в долях индуктивности ударного генератора  $L_r$ , число циклов накопления —  $m$ , величина энергии, переданной генератором нагрузке  $Q_n$  и величина энергии, на которую должна быть рассчитана конденсаторная батарея  $Q_c$  в процентах от  $Q_n$ . В качестве генератора принят ударный генератор с гладким якорем указанных выше габаритов:  $D_p = 1250$  мм,  $l_1 = 6000$  мм. Расчеты показывают, что в течение 6 периодов накопления ударный генератор передает нагрузке практически весь запас электромагнитной энергии ротора.

Таким образом, нами показано, что задача накопления и передачи в индуктивную нагрузку энергии в сотни мегаджоулей может быть решена на современном этапе развития электромашиностроения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. P. L. Kapitza. Proc. Roy. Soc., A, 115, № 772, 1927.
  2. М. П. Костенко. Электрические машины (специальная часть). ГЭИ, 1949.
  3. Е. Г. Комар. Ударные генераторы завода «Электросила», ВЭП, № 1, 1940.
  4. Аккумуляция энергии во вращающихся электрических машинах. Экспресс-информация «Электрические машины», № 36, 1970.
  5. Л. П. Побережский. Об индуктивных накопителях энергии. Тр. МЭИ, «Электроэнергетика», вып. 45, 1963.
  6. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. Удельная энергия ударного генератора. Известия ТПИ, т. 132, 1965.
  7. Предельные мощности двух- и четырехполюсных турбогенераторов. Экспресс-информация «Электрические машины», № 11, 1970.
  8. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков, В. В. Ивашин, А. В. Лоос. Устройство для накопления энергии в индуктивной нагрузке. Авт. свидетельство № 184334.
  9. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков, В. В. Ивашин. Способ передачи энергии индуктивной нагрузке от генератора ударной мощности. Авт. свидетельство № 192922.
-