

## НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКЕ ОТ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

В. В. ИВАШИН, А. В. ЛООС, Г. А. СИПАЙЛОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники).

Накопление энергии во вращающихся маховых массах является наиболее экономичным по сравнению с емкостным и даже с индуктивным накоплением энергии. Преобразование кинетической энергии, запасенной маховыми массами, в электромагнитную энергию обычно осуществляется с помощью электрических машин. Передача электромагнитной энергии от электрической машины в индуктивную нагрузку, с точки зрения ее коммутации, представляет собой менее сложную задачу, чем передача энергии от конденсаторной батареи или от индуктивного накопителя.

Недостатком импульсного получения электромагнитной энергии с помощью электрических машин является то, что за время одной полуволны переменного напряжения можно передать в нагрузку лишь небольшую долю энергии, запасенной маховыми массами. С целью увеличения электромагнитной энергии, получаемой за время одного импульса, создаются специальные электрические машины, одной из которых является однофазный генератор ударной мощности — «ударный генератор» типа генератора Капицы — Костенко [1].

Включение ударного генератора на нагрузку обычно осуществляется в момент прохождения э.д.с. через нулевое значение. Ток первой положительной полуволны за счет аперриодической составляющей при этом имеет максимальную амплитуду и длительность. Нарастание тока происходит в течение всего положительного полупериода напряжения, и максимум его достигается в момент изменения знака э.д.с. при  $\omega t = \pi$ . Однако даже с помощью ударного генератора можно передать в нагрузку за время одного первого импульса не более 5—10% кинетической энергии, запасенной вращающимся ротором.

Долю энергии, передаваемой ударным генератором в нагрузку, можно существенно увеличить, если осуществить передачу ее не за один, а за несколько положительных полупериодов напряжения. Учитывая, что при замыкании ударного генератора на нагрузку ток в цепи может достигать десятков и даже сотен тысяч ампер, осуществить коммутацию таких токов с помощью обычных вентилях, например, тиратронов или игнитронов, практически невозможно. Этим, в частности, объясняется тот факт, что генераторы ударной мощности до сих пор не получили необходимого распространения.

Применение бездуговых ионно-механических коммутирующих устройств [2, 3] решает проблему коммутации тока генератора ударной мощности и тем самым позволяет осуществить передачу энергии в де-

сятки мегаджоулей от ударного генератора в индуктивную нагрузку за время, измеряемое десятками миллисекунд.

### Принцип работы

Принципиальная схема накопления энергии в индуктивной нагрузке и формирования в ней импульсов тока или, соответственно, магнитного поля квазипризматической формы от генератора ударной мощности представлена на рис. 1, где УГ — однофазный генератор ударной

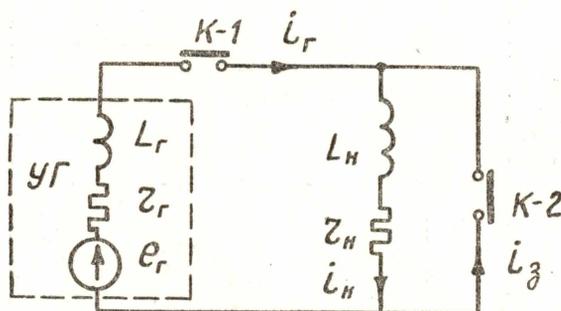


Рис. 1. Схема накопления энергии в индуктивности от однофазного ударного генератора.

мощности, источник энергии,  $L_r$ ,  $r_r$  — индуктивность рассеяния и активное сопротивление генератора,  $L_n$ ,  $r_n$  — то же нагрузки,  $r_3$  — активное сопротивление закоротки,  $K-1$ ,  $K-2$  — бездуговые ионно-механические коммутирующие устройства.

В исходном состоянии коммутирующие устройства  $K-1$  и  $K-2$  разомкнуты, возбужденный до номинального напряжения генератор работает вхолостую. Включение генератора на нагрузку производится коммутатором  $K-1$  в момент прохождения э. д. с. через нулевое значение. За время первой, положительной, полуволны напряжения, ток в нагрузке возрастает от нуля до значения  $I_{1m}$  (рис. 2). Когда ток в цепи генератор-нагрузка достигает своего максимального значения, производится замыкание (закорачивание) нагрузки коммутатором  $K-2$ . В течение времени, когда нагрузка закорочена коммутатором  $K-2$ , энергия в ней за вычетом потерь на активных сопротивлениях контура сохраняется. Затухание тока за этот промежуток времени определяется постоянной времени контура нагрузка-закорotka.

В момент максимума тока  $I_{1m}$  напряжение генератора проходит через нулевое значение ( $\omega t = \pi$ ,  $e_r = 0$ ). При изменении знака напряжения ток в генераторе быстро уменьшается; при прохождении тока через нулевое значение генератор отключается коммутатором  $K-1$  (рис. 2).

На время следующей положительной полуволны э. д. с., в момент прохождения её через нулевое значение при  $\omega t = 2\pi$ , генератор с помощью коммутатора  $K-1$  снова включается, но теперь уже на закороченную коммутатором  $K-2$  нагрузку. При этом ток в генераторе быстро возрастает, а в коммутаторе  $K-2$  уменьшается. При прохождении тока в коммутаторе  $K-2$  через нулевое значение, то есть в момент равенства токов генератора и нагрузки, коммутатор  $K-2$  размыкается и далее происходит увеличение тока в нагрузке до значения  $I_{2m}$ .

В момент максимума тока  $I_{2m}$  коммутатор  $K-2$  снова замыкается, и далее процесс идет так же, как и после замыкания коммутатора  $K-2$  при первом максимуме тока, равном  $I_{1m}$ . Таким образом, можно обеспечить ввод энергии от ударного генератора в индуктивную нагрузку

в течение нескольких положительных полупериодов напряжения. При этом нарастающая часть кривой тока получается ступенчатой. Длительность нарастающей части импульса тока при частоте э. д. с. генератора, равной 50 гц, в этом случае можно получить равной 10, 30, 50, 70 и т. д. миллисекунд. Следует отметить, что приращение тока нагрузки за каждую последующую ступень будет меньше, чем за предыдущую. Опти-

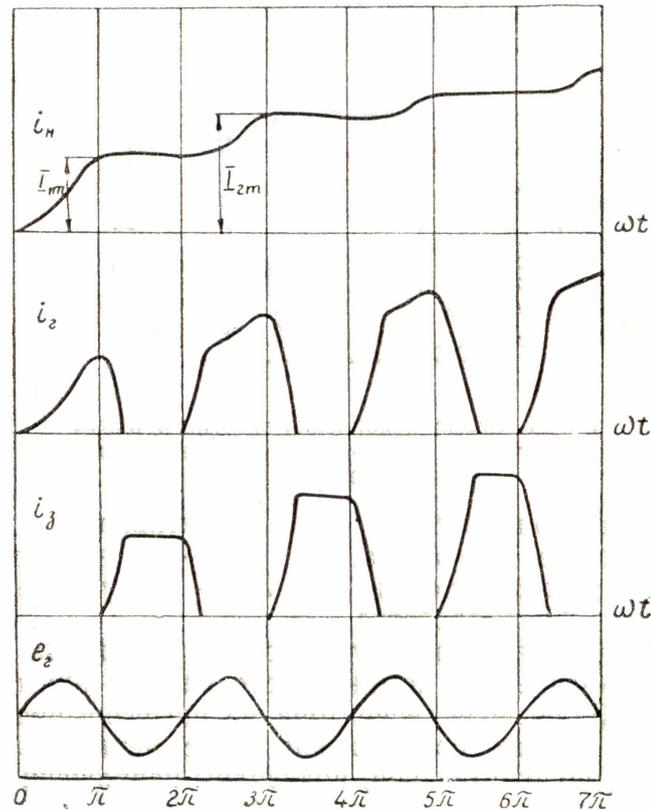


Рис. 2. Форма кривых э. д. с. генератора и токов в различных элементах схемы:  $i_n$  — в нагрузке,  $i_r$  — в генераторе,  $i_3$  — в закоротке.

мальное число ступеней в кривой тока нагрузки определяется, главным образом, соотношением между параметрами генератора и нагрузки. Но при необходимости схема позволяет ограничиться любым наперед заданным числом ступеней.

Если вся переданная от ударного генератора энергия расходуется в нагрузке, то после достижения максимума ток в нагрузке, замкнутой коммутатором  $K-2$ , будет уменьшаться по экспоненте с постоянной времени, определяемой параметрами короткозамкнутого контура. В случае необходимости энергия, накопленная в нагрузке, за вычетом потерь, может быть возвращена генератору путем последовательных включений и выключений коммутаторов  $K-1$  и  $K-2$ . При этом следует включать генератор на время или часть времени отрицательной полуволны напряжения (инверторный режим).

В рассматриваемой схеме работы ударного генератора инверторный режим может быть осуществлен при любом из углов кратных  $\pi(2n+1)$ . Если осуществить инверторный режим при угле  $\omega t \approx 3\pi$ , то после замыкания коммутатора  $K-2$  при  $i_3 = 0$  ток в нагрузке будет быстро уменьшаться до нуля, и при прохождении тока через нулевое значение

нагрузка может быть отключена коммутатором  $K-1$ . Этому моменту соответствует точка  $t_4$  на рис. 3. В результате такой коммутации в нагрузке формируется импульс тока или соответственно магнитного поля квазитрапецеидальной формы с почти плоской вершиной «плато» длительностью  $T$ , где  $T$  — период э. д. с. генератора (рис. 3).

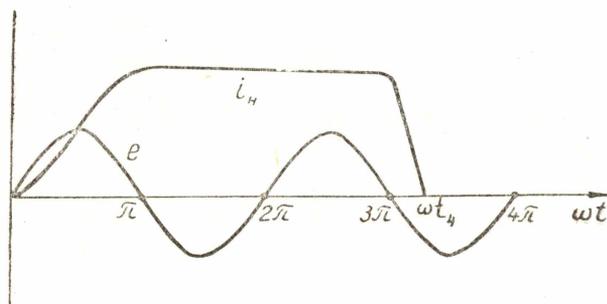


Рис. 3. Квазитрапецеидальная форма тока в индуктивной нагрузке.

Предельная величина энергии, которая может быть накоплена в индуктивности  $L_n$  по рассматриваемой схеме, равна

$$Q_m = \frac{1}{2} L_n I_{уд}^2,$$

где  $I_{уд}$  — максимальное значение тока короткого замыкания с учетом апериодической составляющей.

#### Исследование работы генератора с помощью аналоговой вычислительной машины

Аналитическое исследование работы описанной схемы путем анализа дифференциальных уравнений, записанных для каждого этапа работы, — задача сложная и очень трудоемкая. Решение уравнений, описывающих отдельные этапы, на аналоговой машине МНБ-1 не вызывает трудностей. Однако раздельное решение уравнений для каждого этапа не дает общей картины работы рассматриваемой схемы, требует при каждом решении определения и введения в машину начальных условий из предыдущего решения.

Для получения цельной картины работы ударного генератора на индуктивную нагрузку разработана математическая модель, коммутация в которой и введение начальных условий при переходе от одного этапа к другому осуществлялись специальным программным устройством. При моделировании были приняты следующие допущения: 1) активные сопротивления обмоток неизменны, 2) потери в стали отсутствуют, 3) индуктивность обмоток не зависит от величины тока, 4) скорость вращения генератора постоянна. Последние два допущения хотя и являются грубыми, однако они не искажают качественной картины работы схемы и практически слабо влияют на число ступеней, при которых достигается ток заданной величины.

Уменьшение скорости вращения генератора сказывается, главным образом, на увеличении длительности каждой последующей ступени и в связи с этим на увеличении потерь в схеме. При дальнейших исследованиях схемы предполагается учитывать как насыщение стали, так и изменение скорости вращения генератора.

Переходный процесс на первом этапе работы схемы, то есть при замыкании коммутатора К-1 в момент прохождения э. д. с. через нулевое значение при разомкнутом К-2, описывается уравнением

$$E_m \sin \omega t = i_r(r_r + r_n) + (L_r + L_n) \frac{di_r}{dt}. \quad (1)$$

На первом этапе ток генератора равен току нагрузки.

Второй этап начинается с момента замыкания коммутатором К-2 индуктивности  $L_n$ , в которой ток к этому времени достиг максимального значения  $I_{lm}$ , при этом переходный процесс описывается уравнениями

$$E_m \sin \omega t = i_r r_r + L_r \frac{di_r}{dt} + i_n r_n + L_n \frac{di_n}{dt}, \quad (2)$$

$$0 = i_n r_n + L_n \frac{di_n}{dt} + i_3 r_3, \quad (3)$$

$$0 = i_r + i_3 - i_n. \quad (4)$$

В момент перехода тока генератора через нулевое значение происходит размыкание К-1. С этого времени работа схемы описывается уравнением (3). Ток нагрузки на этом этапе равен току коротки. При следующей положительной полуволне э. д. с. в момент прохождения ее через нулевое значение происходит замыкание К-1. Переходные процессы на четвертом этапе описываются уравнениями (2), (3) и (4).

В момент прохождения тока в коротке через нулевое значение происходит размыкание К-2. Переходный процесс на пятом этапе описывается уравнением (1). Далее все этапы работы повторяются.

Математическая модель работы ударного генератора на индуктивность  $L_n$  представлена на рис. 4. Переключения в математической модели производятся при помощи реле  $P_1, P_2, P_3$  и  $P_4$ , которые срабатывают в определенные моменты времени. Эти реле включены последовательно с лампами  $L_1, L_2, L_3$  и  $L_4$ , на сетки которых поступает управляющее напряжение от блоков 8, 9 и 10. В цепи обратной связи блоков 8, 9 и 10 включены диодные ограничители, поэтому при переходе входной величины через нулевое значение на выходе этих блоков напряжение скачком изменяет знак. Это позволяет управлять работой схемы в функции от э. д. с. генератора, тока генератора и тока коротки. Реле  $P_5$  служит для подготовки схемы управления к началу следующего цикла накопления.

Э. д. с. синусоидального вида получается от специального генератора (блоки 5, 6, 7). Блок 1 служит для воспроизведения тока нагрузки. На второй вход блока подается э. д. с. генератора с коэффициентом передачи

$$k_{12} = \frac{1}{L_r} \cdot \frac{M_E M_I}{M_t},$$

где  $M_E$  — масштаб напряжения,  
 $M_I$  — масштаб тока,  
 $M_t$  — масштаб времени.

Величина активного сопротивления нагрузки устанавливается при помощи коэффициента

$$k_{11} = M_t \frac{r_n}{L_n}.$$

Блок 2 служит для воспроизведения тока генератора. Величина активного сопротивления генератора устанавливается при помощи коэффициента

$$K_{21} = M_t \frac{r_r}{L_r}$$

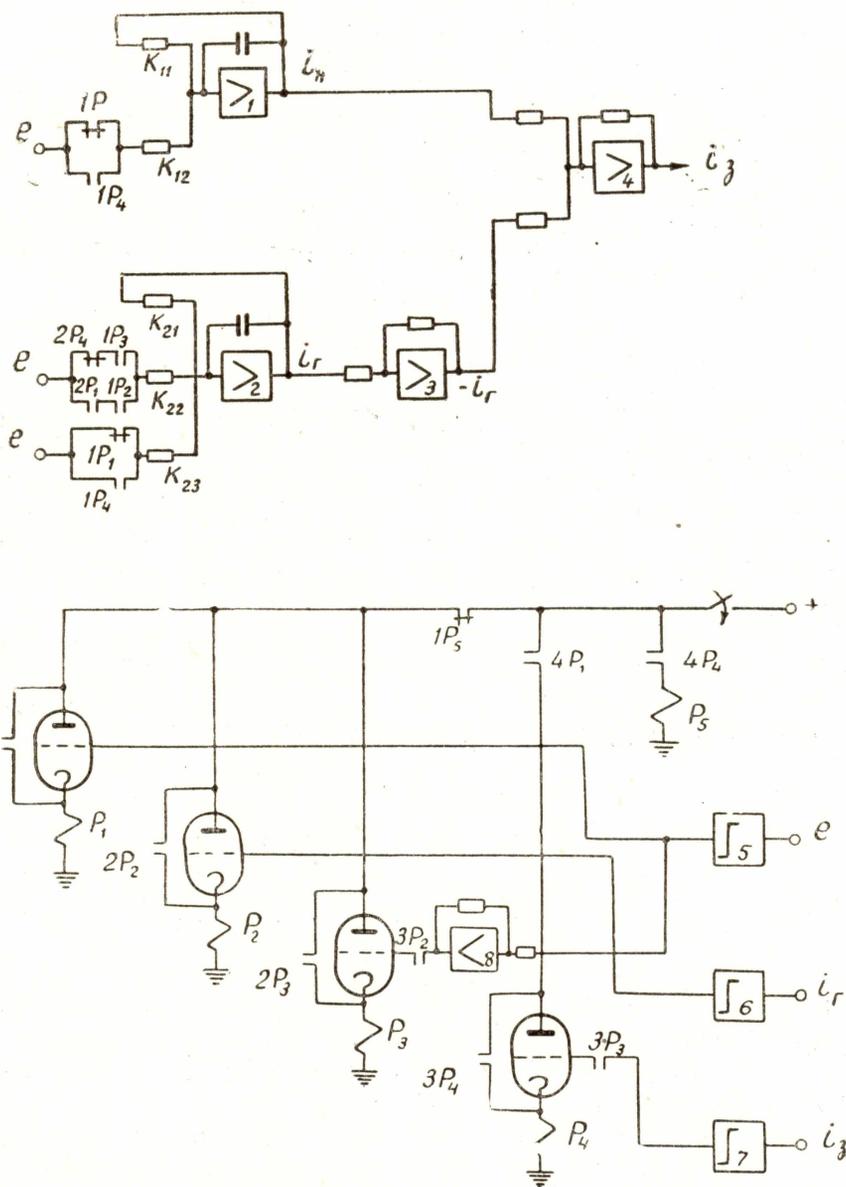


Рис. 4. Математическая модель схемы работы ударного генератора на индуктивный накопитель.

Коэффициенты передачи остальных входов вычисляются по выражениям:

$$K_{22} = \frac{1}{L_r} \cdot \frac{M_E M_I}{M_t},$$

$$K_{23} = \frac{1}{L_r + L_H} \cdot \frac{M_E M_I}{M_t}.$$

С выхода суммирующего блока 4 снимается напряжение, пропорциональное  $i_3$ . Исследование влияния различных параметров на работу схемы накопления энергии производится изменением коэффициентов  $\kappa_{11}$ ,  $\kappa_{12}$ ,  $\kappa_{21}$ ,  $\kappa_{22}$ ,  $\kappa_{23}$ .

Переходные процессы, происходящие в математической модели, описываются системой уравнений:

$$pU_1 = -(\kappa_{11}U_1 + \kappa_{12}U_7), \quad (5)$$

$$pU_2 = -(\kappa_{21}U_2 + \kappa_{22}U_7 + \kappa_{23}U_7), \quad (6)$$

$$U_4 = -U_1 + U_2, \quad (7)$$

где  $U_1, U_2, \dots$  — напряжения на выходе решающих усилителей.

Рассмотренная математическая модель воспроизводит весь процесс накопления энергии в индуктивности.

Исследования работы ударного генератора на индуктивный накопитель проводились для следующих соотношений между индуктивностями генератора и нагрузки

$$L_n = L_r, 2,5L_r, 5L_r, 7,5L_r, 10L_r \text{ при } \frac{r_r}{L_r} = 0,05.$$

Максимальное значение тока в накопителе равно току внезапного короткого замыкания ударного генератора. Как показали расчеты, такой ток для индуктивности  $L_n = 10L_r$  достигается за 40 циклов, где каждый цикл соответствует одной ступени тока. Однако практически целесообразно стремиться к достижению максимальной величины тока, так как на последних ступенях прирост тока незначителен, а потери максимальны.

В табл. 1 приведены результаты исследования работы схемы, показывающие число периодов э. д. с. генератора  $n$ , за которое ток в нагрузке достигает значения, равного  $0,9 I_d$  при различных соотношениях индуктивностей нагрузки и генератора.

Таблица 1

$L_n/L_r$	1	2,5	5	7,5	10
$n$	4	8	14	20	25

Одна из осциллограмм, показывающая характер изменения тока в нагрузке и в других элементах схемы для  $L_n/L_r = 2,5$ , показана на рис. 5, где  $i_n$  — ток нагрузки,  $i_3$  — ток коротки,  $i_r$  — ток генератора,  $e_r$  — э. д. с. генератора.

Рассмотренная схема может быть использована как при работе ударного генератора непосредственно на индуктивную нагрузку, так и для накопления энергии в индуктивности. Если за время одной полуволны э. д. с. от ударного генератора предельных габаритов можно передать в нагрузку, индуктивность которой равна индуктивности генератора, около 20 мдж электромагнитной энергии, то за время многих полуволн э. д. с. одного знака эта энергия может быть увеличена в несколько раз.

Таким образом, накопление энергии в индуктивной нагрузке осуществляется в две ступени. На первой ступени первичный двигатель сравнительно небольшой мощности раскручивает ротор ударного генератора до номинальной скорости, при этом потери энергии незначительны и определяются в основном потерями холостого хода генератора. На вто-

рой ступени ударный генератор преобразует запасенную кинетическую энергию в электромагнитную и передает ее в индуктивную нагрузку. Так как скорость передачи энергии от ударного генератора в нагрузку велика, то потери энергии при этом будут также небольшими по сравнению с передаваемой энергией. Таким образом, общий к. п. д. зарядной установки при работе по рассмотренной схеме будет высоким, а мощность источника энергии — первичного двигателя — сравнительно небольшой.

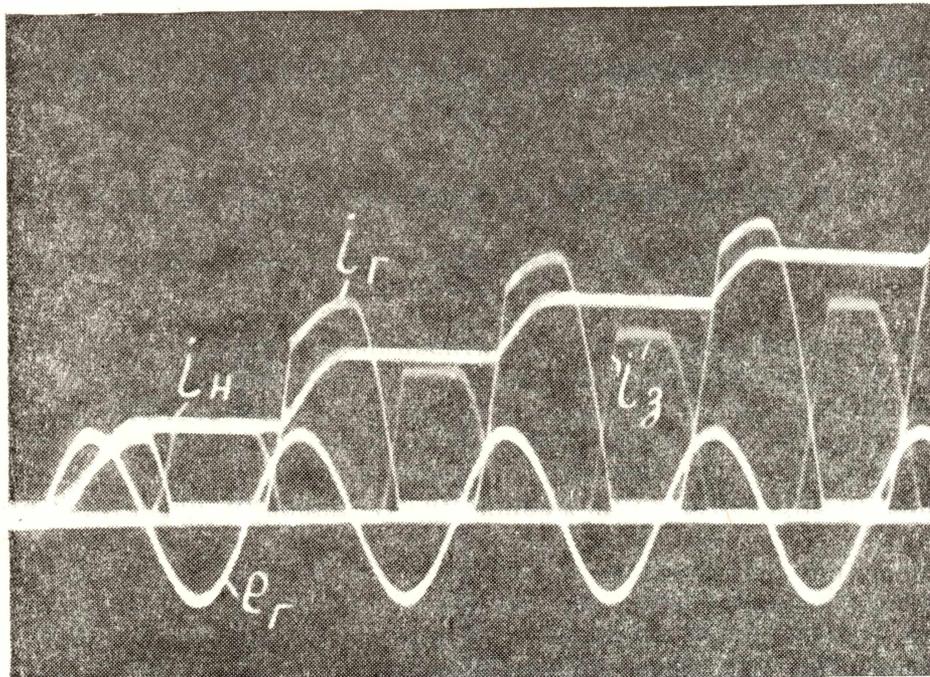


Рис. 5. Осциллограмма.

Импульсы тока ступенчатой формы, как и импульсы тока с плоской вершиной, получаемые от ударного генератора, могут найти применение в установках для термоядерных исследований и в ряде других случаев, где необходимы энергии, измеряемые десятками мегаджоулей, и где их получение от конденсаторных батарей или от каких-либо других источников энергии представляет большие технико-экономические трудности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П. Л. Капица. Proc. Roy. Soc. A 115, № 772, 1927.
2. В. В. Ивашин, Г. А. Сипайлов. Коммутация тока генератора ударной мощности. Вопросы теории и проектирования электрических машин, Межвузовский сборник трудов, выпуск 3, Новосибирск, 1963.
3. В. В. Ивашин, Г. А. Сипайлов. Бездуговое отключение больших токов. Электротехника, № 9, 1964.