

## ЭЛЕКТРОМАШИННЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

А. В. ЛООС, Г. А. СИПАЙЛОВ, А. А. ЩЕГОЛЕВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Существующие решения повышения импульсной мощности ударных генераторов, основанные на применении специальных схем, обладают существенным недостатком, так как требуют наличия вспомогательного накопителя энергии — конденсаторной батареи [1, 2]. Повышение же импульсной мощности путем возбуждения ударного генератора до более высокого напряжения, чем номинальное применение форсированных режимов возбуждения ведет к значительным потерям энергии и требует мощного источника возбуждения [3].

В рассматриваемом электромашинном источнике энергии удастся увеличить импульсную мощность и, следовательно, энергию, передаваемую в нагрузку за время одной полуволны эдс без применения вспомогательных накопителей энергии и источников возбуждения.

Повышение импульсной мощности достигается за счет использования известного эффекта повышения напряжения, возникающего при двухфазном коротком замыкании синхронной машины с несимметричным ротором на остающейся разомкнутой третьей фазе статора [4]. Полное напряжение разомкнутой фазы  $e_a$  складывается из суммы напряжения холостого хода  $e_{a0}$  и дополнительного напряжения

$\Delta e_{a \max}$ :

$$e_a = e_{a0} + \Delta e_{a \max} = \left( 2 \frac{x''_q}{x''_d} - 1 \right) e_{a0}. \quad (1)$$

Как следует из выражения (1), максимальное значение напряжения на разомкнутой фазе в сильной степени зависит от соотношения параметров машины по продольной и поперечной осям  $x''_d$  и  $x''_q$ .

Рассматриваемый электромашинный импульсный источник энергии содержит ударный синхронный генератор, состоящий из статора и ротора, и коммутирующие аппараты К-1 и К-2 (рис. 1). На статоре расположена двухфазная обмотка, состоящая из двух магнитонесвязанных частей, смещенных одна относительно другой на 90 электрических градусов.

Одна из них, вспомогательная обмотка А, может через коммутирующий аппарат К-1 замыкаться накоротко, другая, рабочая обмотка В, через коммутирующий аппарат К-2 включаться на нагрузку. На роторе расположены обмотка возбуждения  $f$ , питаемая от источника напряжения, и демпферные обмотки  $D_d$  и  $D_q$ . Демпферная обмотка  $D_d$  по оси, совпадающей с осью обмотки возбуждения, выполняется более мощной, чем демпферная обмотка  $D_q$ .

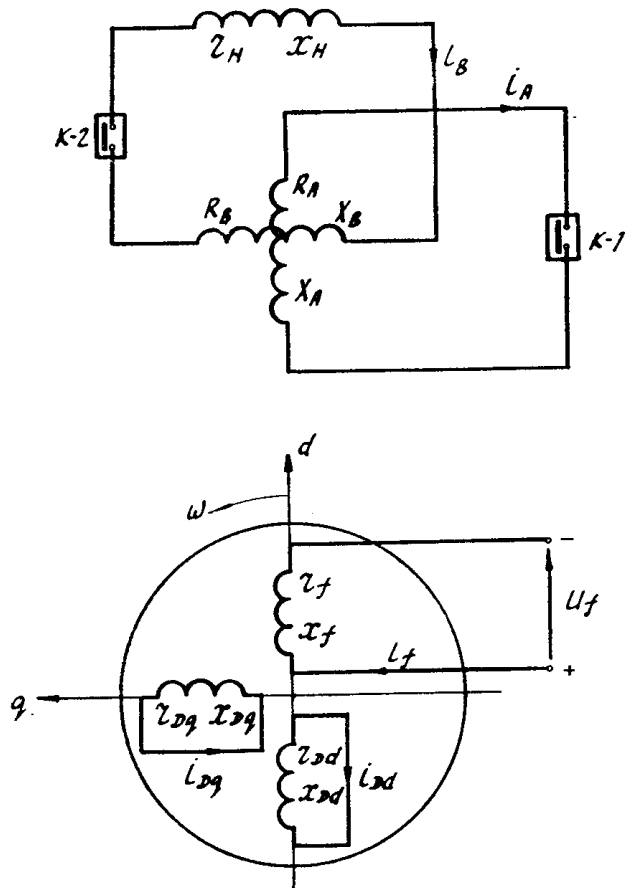


Рис. 1. Принципиальная схема электромагнитного источника импульсов.

В начальном положении контакты коммутирующих устройств К-1 и К-2 разомкнуты, генератор работает на холостом ходу. В обмотках статора А и В наводятся эдс  $e_A$  и  $e_B$ , сдвинутые относительно друг друга на 90 градусов (рис. 2).

В момент времени  $t_1$ , когда эдс вспомогательной обмотки  $e_A$  проходит через нуль, осуществляется замыкание контактов коммутирующего устройства К-1. Генератор попадает в режим короткого замыкания, при этом происходит преобразование кинетической энергии ротора в электромагнитную энергию полей, связанных с обмотками статора и ротора. Характер токов в обмотках А, f, Dd, Dq показан на рис. 2.

С рабочей обмоткой В-статора имеют магнитную связь все обмотки ротора, поэтому величина и характер токов в них определяют ее эдс. Если демпферная система симметрична, то суммарное действие переходных токов в обмотках ротора не приводит к увеличению эдс в рабочей обмотке В. В нашем случае демпферная система несимметрична, демпферная обмотка  $D_q$  имеет большее полное сопротивление, чем обмотка  $D_d$ , следовательно, ток  $i_{Dq}$  будет меньше тока  $i_{Dd}$ . Можно допустить, что основное влияние на эдс в обмотке В будут оказывать обмотки f и  $D_d$ . Так видно на рис. 1 и 2, токи в обмотках f и  $D_d$  намагничивают машину по оси полюсов в одном направлении и, следовательно, основной магнитный поток значительно возрастает. Возрастание же магнитного потока приводит к значительному увеличению эдс в рабочей обмотке В.

В момент времени  $t_2$ , соответствующий моменту начала рабочей полуволны эдс в обмотке В, осуществляет замыкание К-2. При этом за счет возрастания эдс значительно увеличивается ударная мощность ге-

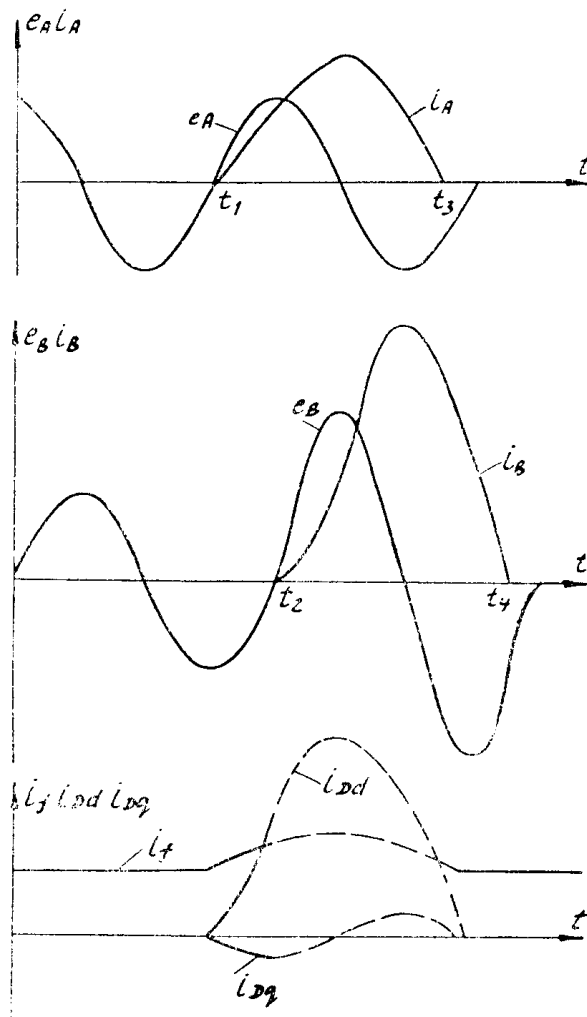


Рис. 2. Кривые э.д.с. и токов в обмотках источника импульсов

нератора и доля кинетической энергии ротора, преобразованной в электромагнитную и переданной в нагрузку.

В момент перехода токов  $i_A$  и  $i_B$  через нуль контакты коммутационных устройств К-1 и К-2 размыкают. Экспериментальные исследования рассматриваемого источника импульсной мощности подтвердили правильность положенных в его основу принципов (рис. 3).

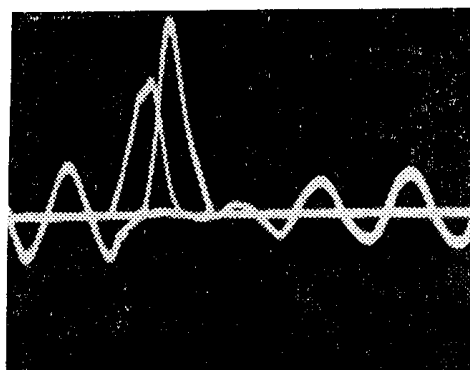


Рис. 3. Осциллограмма эдс  $e_B$  и токов  $i_A$  и  $i_B$  опытного источника импульсов

Более подробные исследования электромашиного источника наиболее целесообразно выполнить по полной системе дифференциальных уравнений электромагнитных переходных процессов. Электромашиный источник импульсной мощности представляет собой электрическую машину с несимметрией статора и ротора. Известно, что применение методов преобразования координат для дифференциальных уравнений синхронных машин с предельной несимметрией не позволяет освободиться от переменных коэффициентов. Необходимость учета насыщения магнитной цепи по пути основного магнитного потока еще в большей степени усложняет исходную систему уравнений и делает невозможным ее аналитическое исследование. В связи с этим возникает необходимость использования для исследований вычислительных машин. Большими возможностями при анализе переходных процессов по дифференциальным уравнениям обладают аналоговые вычислительные машины.

С целью использования известной формы записи синхронной машины в осях  $d$  и  $q$  и методов ее моделирования с учетом насыщения по пути основного магнитного потока [5] применяем искусственное симметрирование генератора со стороны статора. Для этого активные и индуктивные сопротивления обмоток А и В статора представляем в виде:

$$r_A = r + r_a, \quad (2)$$

$$r_B = r + r_b, \quad (3)$$

$$x_A = (x_a + x_s) + x_{sa}, \quad (4)$$

$$x_B = (x_a + x_s) + x_{sb}. \quad (5)$$

Относя вторые слагаемые выражений (3) и (5) к нагрузке  $r_n$ ,  $x_n$  и считая вторые слагаемые выражений (2) и (4) некоторой условной нагрузкой, включенной в обмотку А, получаем симметричную относительно статора двухфазную электрическую машину, в фазах которой включены различные нагрузки.

Применяя известную запись дифференциальных уравнений синхронной машины в осях  $d$  и  $q$  с учетом насыщения по пути основного магнитного потока и составляя уравнения нагрузки в реальных переменных, получаем полную систему дифференциальных уравнений генератора:

$$p\Psi_d = -U_d - r_i d + \omega\Psi_q, \quad (6)$$

$$p\Psi_q = -U_q - r_i q - \omega\Psi_d, \quad (7)$$

$$p\Psi_f = U_f - r_f i_f, \quad (8)$$

$$p\Psi_{Dd} = -r_{Dd} i_{Dd}, \quad (9)$$

$$p\Psi_{Dq} = -r_{Dq} i_{Dq}, \quad (10)$$

$$i_d = \frac{1}{x_s} (\Psi_d - \Psi_{\delta d}), \quad (11)$$

$$i_q = \frac{1}{x_s} (\Psi_q - \Psi_{\delta q}), \quad (12)$$

$$i_f = \frac{1}{x_{sf}} (\Psi_f - \Psi_{\delta f}), \quad (13)$$

$$i_{Dd} = \frac{1}{x_{sDd}} (\Psi_{Dd} - \Psi_{\delta d}), \quad (14)$$

$$i_{Dq} = \frac{1}{x_{sDq}} (\Psi_{Dq} - \Psi_{\delta q}), \quad (15)$$

$$\Psi_{\delta d} = \gamma(i_d + I_f + i_{Dd}), \quad (16)$$

$$\Psi_{\delta q} = \gamma(i_q + i_{Dq}), \quad (17)$$

$$\gamma = \Phi(\Psi_{\delta}^2), \quad (18)$$

$$\Psi_{\delta} = \sqrt{\Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2}, \quad (19)$$

$$U_d = U_A \cos\theta + U_B \sin\theta, \quad (20)$$

$$U_q = -U_A \sin\theta + U_B \cos\theta, \quad (21)$$

$$U_A = r_a i_A + x_{sa} \frac{di_A}{dt}, \quad (22)$$

$$U_B = (r_H + r_b) i_B + (x_H + x_{sb}) \frac{di_B}{dt}, \quad (23)$$

$$i_A = i_d \cos\theta - i_q \sin\theta, \quad (24)$$

$$i_B = i_d \sin\theta + i_q \cos\theta. \quad (25)$$

Математическая модель системы (6) — (25) представлена на рис. 4. Насыщение магнитной цепи по пути основного магнитного потока определяется в функции от потокоцепления в воздушном зазоре  $\psi_{\delta}$ . При индуктивном характере нагрузки генератора в схеме решения имеются два дифференцирующих элемента. При активной нагрузке возможно исключение операции дифференцирования.

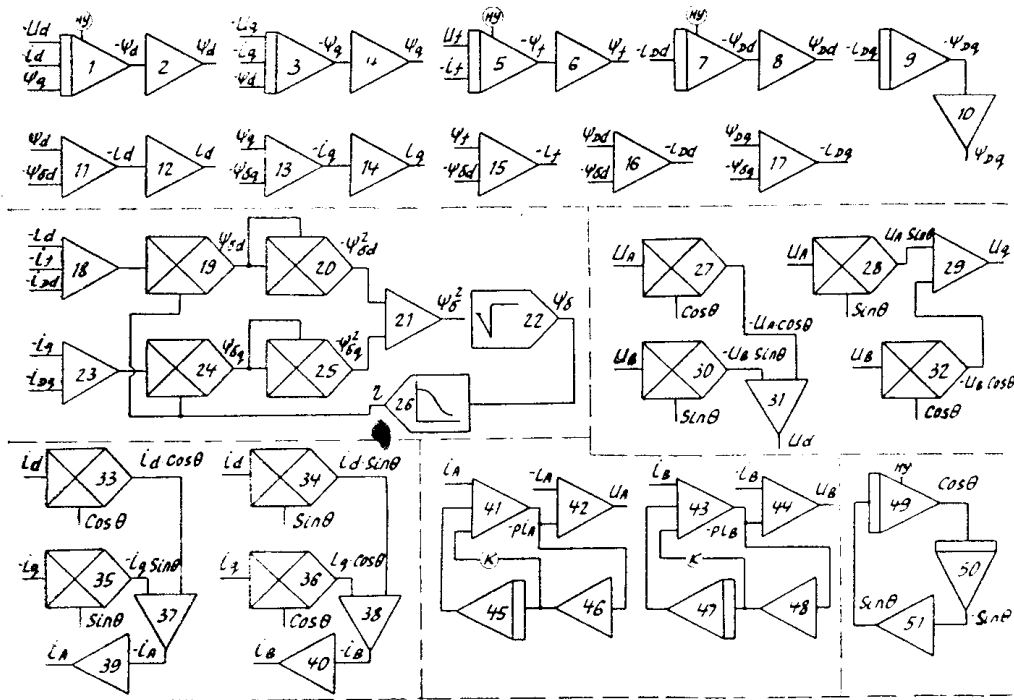


Рис. 4. Математическая модель дифференциальных уравнений источника импульсов

Таким образом, экспериментальное исследование электромашинного источника импульсной мощности подтвердило правильность положенных в его основу принципов и возможность существенного увеличения импульсной мощности ударных генераторов. Разработанная математическая модель электромашинного импульсного источника энергии позволяет производить его исследования при любых соотношениях парамет-

ров обмоток с учетом насыщения магнитной цепи основным магнитным потоком.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Каплан, В. М. Нашатырь. Способ накопления энергии в индуктивной нагрузке. Авторское свидетельство № 164640.
2. Г. А. Сипайлов, В. В. Ивагин, К. А. Хорьков. Способ передачи энергии индуктивной нагрузке от генератора ударной мощности, Авторское свидетельство № 192922.
3. А. И. Верхотуров. Исследование прерывистых режимов возбуждения ударного генератора. Кандидатская диссертация, Томск, 1968.
4. И. М. Постников. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. «Техника», 1966.
5. Н. И. Соколов. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. «Энергия», 1970.