

## СИНХРОННЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ

Г. А. СИПАЙЛОВ, А. В. ЛООС, Э. И. СОБКО, В. П. ЛИТВИНОВ

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

В настоящее время разработано большое количество типов и конструкций импульсных электромашинных источников, которые нашли широкое промышленное применение благодаря своей относительно невысокой стоимости и простоте обслуживания [1, 2]. Увеличение импульсной мощности электромашинных генераторов импульсов, а также допустимой частоты их следования являются актуальной задачей, так как их возрастание приводит к улучшению габаритно-весовых и энергетических показателей импульсной системы.

Существующий прогресс в области полупроводниковых приборов (появление разнообразных по эксплуатационным параметрам силовых диодов, тиристоров, симисторов и т. д.) создает предпосылки для разработки новых конструктивных и схемных решений повышения импульсной мощности электромашинных генераторов.

В работе рассматривается синхронный импульсный генератор, в цепь демпферной обмотки по поперечной оси которого включено полупроводниковое коммутирующее устройство. Включение полупроводниковых вентилях в цепь демпферной обмотки по поперечной оси у однофазных синхронных генераторов, работающих в установившемся режиме, известно и позволяет использовать обратно-вращающееся поле для возбуждения машины [3]. Рассмотрим работу такого генератора в импульсном режиме.

На рис. 1, а показана принципиальная схема импульсного синхронного генератора, в демпферную обмотку по оси  $q$  которого введен коммутирующий аппарат.

Здесь  $S$ ,  $f$ ,  $D_d$ ,  $D_q$  — обмотки генератора, соответственно статорная, возбуждения и демпферные по осям  $d$  и  $q$ ;

$L_H$  — нагрузка генератора;

$K-1$ ,  $K-2$  — коммутирующие устройства.

На рис. 1, б показаны кривые э. д. с. генератора  $I_1$ , тока  $i_c$  в статорной обмотке  $S$ , тока  $i_{Dq}$  и потокосцепления  $\Psi_{Dq}$  в демпферной обмотке по оси  $q$ .

В исходном состоянии ротор генератора вращается с угловой скоростью  $\omega$ , имея при этом определенный запас кинетической энергии. Обмотка возбуждения, запитанная постоянным током  $i_{f0}$ , создает начальный магнитный поток, который при вращении наводит в статорной обмотке синусоидальную э. д. с. Коммутирующие устройства  $K-1$ ,  $K-2$  разомкнуты.

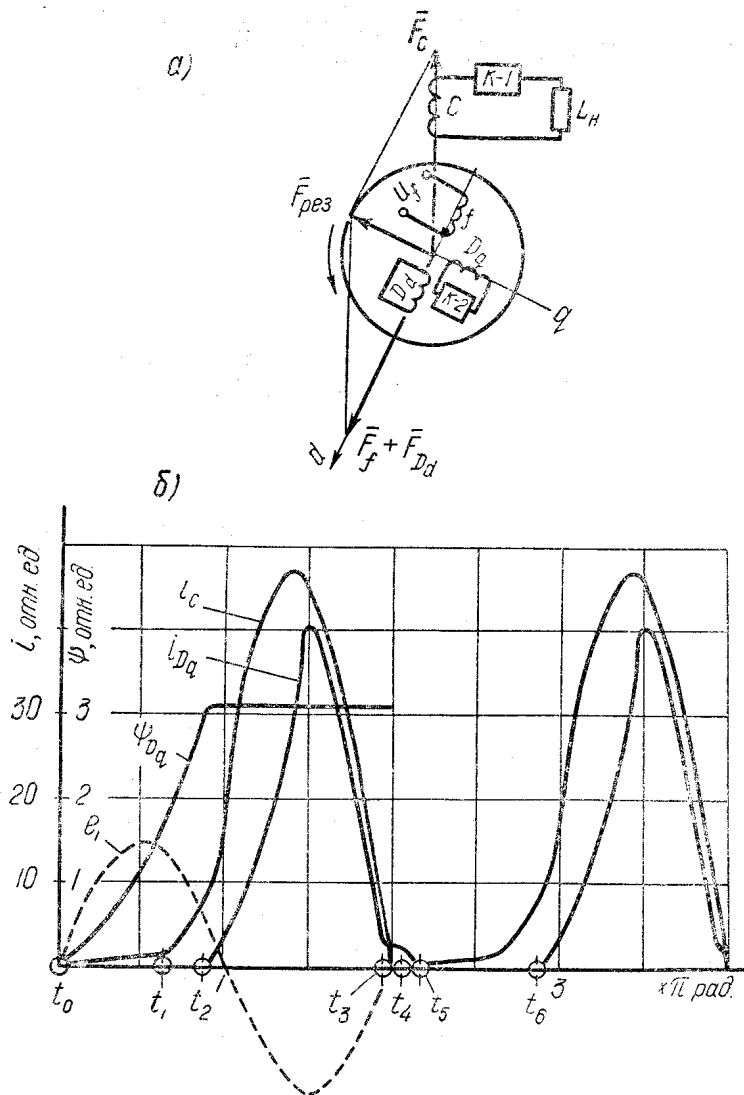


Рис. 1. Принципиальная схема синхронного импульсного генератора и расчетные кривые токов в его обмотках

В момент перехода э. д. с. обмотки статора через нуль  $t_0$  (рис. 1, б) производят включение генератора на нагрузку  $L_H$ . Ток в статорной обмотке начинает медленно нарастать, стремясь сохранить захваченный статорной обмоткой начальный магнитный поток. Ввиду того, что коммутирующий аппарат К-2 разомкнут (по оси  $q$  как бы отсутствует демпферная обмотка), ток статорной обмотки  $C$  до момента времени

$t_1 \approx \frac{\pi}{2\omega}$  нарастает незначительно, так как для поддержания захва-

ченного статорной обмоткой магнитного потока требуется небольшая намагничивающая сила. С момента времени  $t_1$  происходит быстрое нарастание тока статора  $i_c$ , так как магнитная проводимость для потока реакции якоря начинает уменьшаться вследствие его возрастающего экранирования контурами ротора по продольной оси.

Токи  $i_c$ ,  $i_f$ ,  $i_{Dd}$  создают результирующую намагничивающую силу  $\bar{F}_{рез}$  (рис. 1, а), которая создает результирующий магнитный поток машины, потокосцепление которого с обмоткой  $D_d$  достигает максимального значения при угле  $180^\circ > \omega t > 90^\circ$ .

Определим выражение для потокосцепления демпферной обмотки по поперечной оси  $q$  при условии, что активные сопротивления обмоток равны нулю. В этом случае токи всех контуров машины можно определить из условия постоянства потокосцеплений, что позволяет перейти от системы дифференциальных уравнений к алгебраическим [4]. При выводе расчетных выражений будем считать, что обмотка  $D_d$  по оси  $d$  отсутствует. Такое упрощение не нарушает качественной картины процессов. При принятых начальных условиях

$$\Psi_c(0) = i_{f0}x_a, \quad \Psi_f^s(0) = i_{f0}x_f, \quad \Psi_{Dq}(0) = 0,$$

выражение для тока  $i_c$  имеет вид

$$i_c = \frac{2 i_{f0} x_a (1 - \cos \gamma)}{(x'_d + x_c) + (x'_d - x_c) \cos 2\gamma}, \quad (1)$$

где  $X'_d$  — переходное индуктивное сопротивление генератора,

$$\gamma = \int_0^t \omega dt \quad \text{— угол поворота ротора.}$$

Потокосцепление демпферной обмотки  $\Psi_{Dq}$  по оси  $q$

$$\Psi_{Dq} = i_c x_a \sin \gamma = \frac{2 x_a^2 i_{f0} (1 - \cos \gamma) \sin \gamma}{(x'_d + x_c) + (x'_d - x_c) \cos 2\gamma}. \quad (2)$$

Анализ выражения (2) показывает, что потокосцепление  $\Psi_{Dq}$  (рис. 1, б) в зависимости от параметров может в 2—4 раза превышать максимальное значение потокосцепления холостого хода  $i_{f0} X_a$  и достигать своего максимального значения при  $\gamma$ , несколько меньших  $180^\circ$ .

В момент времени  $t_2$ , соответствующий максимальному значению потока, сцепленного с обмоткой  $D_q$ , происходит замыкание коммутирующего аппарата К-2 (рис. 1, а).

Таким образом, магнитный поток захватывается демпферной обмоткой  $D_q$  и при дальнейшем вращении ротора остается постоянным в силу закона сохранения постоянства потокосцеплений. На роторе образуются системы контуров по продольной и поперечной осям, которые создают результирующий поток ротора, превосходящий поток холостого хода машины.

При повороте ротора происходит дальнейшее возрастание тока  $i_c$ , достигающего максимального значения в момент совпадения оси обмотки статора и оси результирующего потока ротора.

Определим выражения для токов  $i_c$  и  $iD_q$ , начиная с момента  $t_2$ , когда замыкается коммутирующий аппарат К-2. В момент времени  $t_2$  ось  $d$  будет сдвинута относительно фазы  $S$  на угол  $\omega t_2$ . При начальных условиях

$$\Psi_c(t_2) = i_{f0}x_a, \quad \Psi_f(t_2) = i_{f0}x_f, \quad \Psi_{Dq} = \Psi_{Dq}(t_2)$$

выражения для токов  $i_c$  и  $iD_q$ , начиная с момента  $t_2$ , имеют вид:

$$i_c = \frac{i_{f0}x_a x_f^2 (1 - \cos \gamma) - \Psi_{Dq}(t_2) \cdot x_f x_a \cdot \sin \gamma}{x'_d x_f^2}, \quad (3)$$

$$i_{Dq} = \frac{\frac{\Psi_{Dq}(t_2)}{2} [(x_c + x'_d) + (x'_d - x_c) \cos 2\gamma] + i_{f0}x_a^2 (\sin \gamma \cos \gamma - \sin \gamma)}{x_f x'_d}. \quad (4)$$

Выражения (1—4) были использованы для расчета кривых (рис. 1, б) при следующих параметрах генератора:  $x_a = 1,0$ ,  $x_c = 1,05$

$$x_f = x_{Dq} = 1,05, \quad L_H = 0, \quad r_c = r_f = r_{Dq} = 0.$$

При дальнейшем повороте ротора ток  $i_c$  уменьшается, а в момент перехода его через нуль  $t_3$  размыкается коммутирующий аппарат К-1. По обмотке  $D_q$ , начиная с момента времени  $t_2$ , протекает ток такой величины, который необходим для сохранения постоянным ее потокоцепления.

После размыкания коммутирующего аппарата К-1 ( $t_3$ ) величина тока  $i_{Dq}$  невелика, так как для создаваемого им магнитного потока сопротивление магнитной цепи мало.

После импульса тока  $i_c$  величина э. д. с. в обмотке статора определяется суммарным магнитным потоком, создаваемым токами обмоток ротора  $i$ ,  $D_q$ , и, следовательно, больше, чем э. д. с. генератора на холостом ходу.

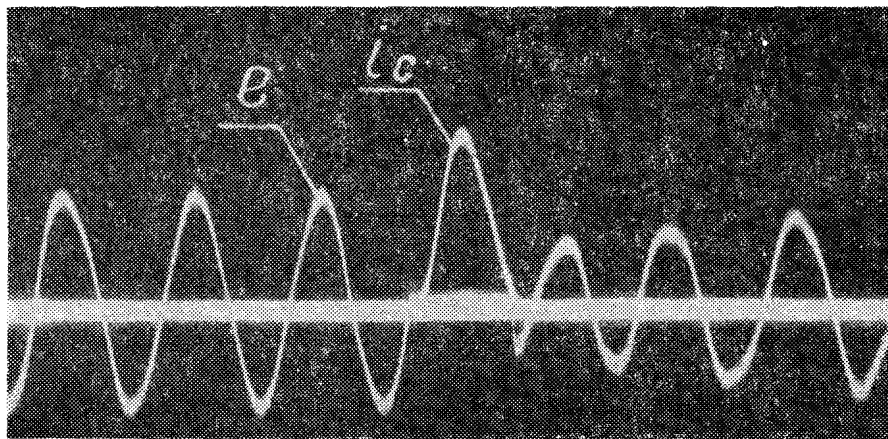
Таким образом, после импульса тока не происходит размагничивания машины и, следовательно, возможно повторное включение генератора на нагрузку.

Наибольшая частота следования импульсов может быть обеспечена, если произвести включение генератора на нагрузку в момент  $t_4$  начала первой после импульса положительной полуволны э. д. с. замыканием К-1. Начиная с момента времени  $t_4$ , происходит возрастание тока  $i_c$  и уменьшение  $i_{Dq}$ .

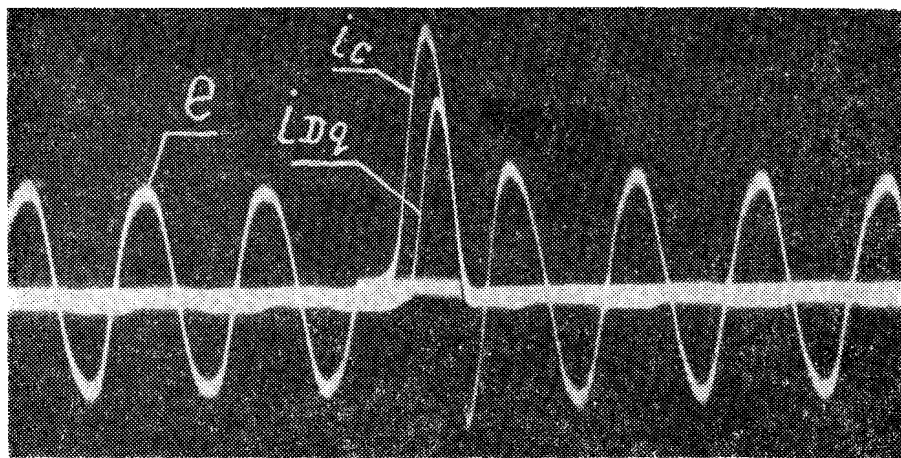
В момент  $t_5$  перехода тока  $i_{Dq}$  через нуль происходит размыкание К-2. Далее процессы в схеме повторяются. Амплитуда второго импульса тока  $i_c$ , как и первого, определяется величиной результирующего магнитного потока ротора, создаваемого системой контуров по продольной и поперечной оси после замыкания К-2 в момент времени  $t_6$ , и равна амплитуде первого импульса.

Однополярный характер тока  $i_{Dq}$  позволяет применить в качестве коммутирующего устройства К-2 полупроводниковый неуправляемый вентиль. Экспериментальная проверка работоспособности синхронного импульсного генератора с высокой частотой следования импульсов была выполнена на макетном образце, изготовленном на базе серийного двигателя АК-51-4. В качестве коммутирующего устройства К-1 был использован тиристор ПТЛ-150-8, коммутирующего устройства К-2 — диод ВК-50-8. При замыкании демпферной обмотки  $D_q$  накоротко схема генератора принимает обычный вид [4]. Это позволяет произвести экспериментальное сравнение эффективности применения рассматриваемых схем генераторов.

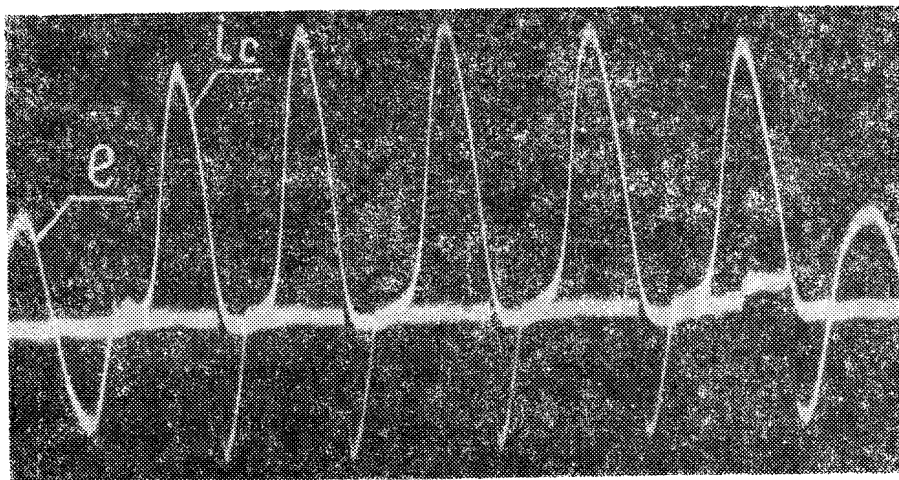
На рис. 2, а приведены осциллограммы э. д. с. и токов в обмотке статора при короткозамкнутой демпферной обмотке по поперечной оси.



а)



б)



в)

Рис. 2. Результаты эксперимента

На рис. 2, б показана осциллограмма э. д. с., токов в обмотке статора и демпферной по оси  $q$  синхронного генератора с коммутирующим устройством в цепи демпферной обмотки  $D_q$ . Сравнение амплитуд тока статора по рис. 2, а и 2, б показывает, что синхронный генератор с коммутирующим устройством в цепи ротора имеет значительно большую импульсную мощность. При этом размагничивающее действие реакции якоря, проявляющееся в уменьшении э. д. с. после импульса тока в генераторе с симметричной демпферной обмоткой (рис. 2, а), в рассматриваемом генераторе отсутствует (рис. 2, б). После импульса тока имеет место даже некоторое возрастание э. д. с. (рис. 2, б). Это позволяет достичь максимально возможной частоты следования импульсов и питать нагрузку серией импульсов с одинаковой мощностью (рис. 2, в).

Таким образом, включение коммутирующего устройства в цепь демпферной обмотки по оси  $q$  позволяет производить без применения дополнительных источников энергии своеобразную форсировку генератора непосредственно в начале каждого импульса тока.

Рассмотренный импульсный синхронный генератор обладает значительными преимуществами в сравнении с обычными генераторами, имеющими симметричную демпферную систему. Его применение в импульсных системах питания значительно расширяет возможности электромашинных источников импульсной мощности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Импульсная электроэнергетика. Сборник статей. Казань, 1970.
2. А. Л. Лившиц, И. С. Рогачев, М. Т. Отто. Генераторы импульсов. «Энергия», 1970.
3. S. No p a k a. Analysis of the Self — Excited Salient — Pole Type Single—Phase Synchronous Machine, I. Inst. Electr. Eng. Japan, 1961, 81, N 3.
4. Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос, Э. И. Собко. Математическое моделирование однофазного синхронного генератора. «Электротехника», 1972, № 10.