

### К РАСЧЕТУ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ ЭСГП В РЕЖИМЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

В. М. ФЕДЯКИН, В. Д. ЭСЬКОВ

(Представлена научным семинаром каф. ТОЭ)

При расчете энергетических характеристик электростатического генератора с транспортерами-проводниками (ЭСГП) последний обычно рассматривают как квазистатическую систему, описываемую в каждый момент времени уравнениями электростатики с сосредоточенными параметрами, связывающими заряды и потенциалы отдельных элементов машины [1, 2]. Зная закон изменения этих параметров во времени, можно получить представление о динамике процессов, происходящих в ЭСГП. Такой подход и используется в настоящей работе для определения мгновенных значений токов в электрических цепях генератора на примере режима короткого замыкания ЭСГП с равномерным распределением потенциала по статору, одной парой полюсов и кондукционной схемой возбуждения, принципиальная схема которого приведена на рис. 1.

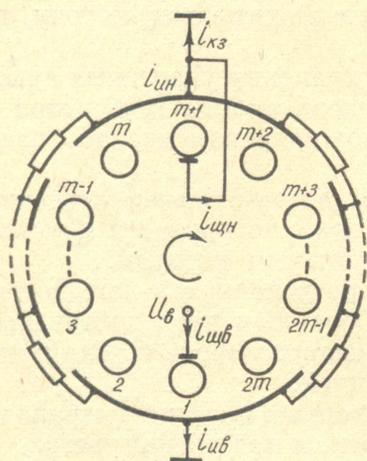


Рис. 1. Принципиальная схема ЭСГП в режиме короткого замыкания

Здесь 1, 2, 3, ... 2m — проводящие транспортеры, симметрично размещенные в диэлектрическом роторе, который совершает  $n$  оборотов в секунду в направлении, указанном стрелкой. Статор состоит из  $2(m-s)$  проводящих пластин, соединенных с делителем напряжения (применение сплошного полупроводящего статора не изменяет принципиальной схемы [2]). Индукторы перекрывают  $s$  транспортеров каждый и могут рассматриваться как  $s$  статорных пластин, замкнутых накорот-

ко. Коммутация осуществляется либо с помощью механического контакта, либо посредством искрового разряда. Каждая из щеток расположена таким образом, что коммутирует только с транспортером, находящимся против середины соответствующего индуктора. Щетка возбуждения имеет потенциал  $U_B$ , а щетка нагрузки в режиме короткого замыкания имеет потенциал, равный нулю, так же, как и все элементы статора.

В силу симметрии системы все процессы, в ней происходящие, повторяются с периодом коммутаций  $T = \frac{1}{2mn}$ , поэтому достаточно рассмотреть лишь один такой период, приняв за  $t=0$  момент начала очередной коммутации.

Время коммутации мало (отличается на несколько порядков от  $T$  [3]), то есть она происходит при практически неподвижном роторе. Поэтому можно коммутационные процессы рассматривать на статической модели, а при анализе динамической модели не учитывать время коммутации.

При этих условиях определим токи в цепях генератора (обозначены на схеме рис. 1):

- $i_{щв}, i_{щн}$  — токи в щетках возбуждения и нагрузки,
- $i_{ив}, i_{ин}$  — токи в цепях соответствующих индукторов,
- $i_{кз}$  — ток короткого замыкания ЭСП,

суммируя по принципу наложения их составляющие в динамической и статической моделях.

#### Токи в динамической модели

Здесь токи в щетках равны нулю, а токи в цепях индукторов можно найти как скорость изменения зарядов этих индукторов:

$$i_{ив} = \frac{dQ_B}{dt}; \quad i_{ин} = -\frac{dQ_H}{dt}. \quad (1)$$

Для определения же зарядов, как показано в [2], целесообразно использовать уравнения с частичными емкостями, причем, не внося существенных погрешностей, в расчете достаточно учесть лишь следующие:

$C_0$  — частичная емкость транспортера относительно заземленных элементов конструкции ЭСП,

$C_2$  — частичная емкость между соседними транспортерами,

$C'_3, C_1, C_3, C_5$  — частичные емкости между элементом статора, противоположащего в момент  $t=0$   $n$ -му транспортеру, и транспортерами  $n+1, n, n-1, n-2$  соответственно.

В первом приближении можно считать не зависящими от времени частичные емкости  $C_0, C_2$  и сумму всех остальных (хотя каждая из последних в отдельности изменяется), тогда величина

$$C_3 = C_0 + C_1 + C_3 + C'_3 + C_5 = \text{const}$$

определяется, как в [2].

При выбранных обозначениях

$$\left. \begin{aligned} -Q_H &= C_1 \sum_{n=m+1-\frac{s-1}{2}}^{m+1+\frac{s-1}{2}} U_n + C_3 \sum_{n=m-\frac{s-1}{2}}^{m+\frac{s-1}{2}} U_n + C'_3 \sum_{n=m+2-\frac{s-1}{2}}^{m+2+\frac{s-1}{2}} U_n + C_5 \sum_{n=m-1-\frac{s-1}{2}}^{m-1+\frac{s-1}{2}} U_n \\ \cdot Q_B &= C_1 \sum_{n=2m+1-\frac{s-1}{2}}^{2m+1+\frac{s-1}{2}} U_n + C_3 \sum_{n=2m-\frac{s-1}{2}}^{2m+\frac{s-1}{2}} U_n + C'_3 \sum_{n=2m+2-\frac{s-1}{2}}^{2m+2+\frac{s-1}{2}} U_n + C_5 \sum_{n=2m-1-\frac{s-1}{2}}^{2m-1+\frac{s-1}{2}} U_n \end{aligned} \right\} (2)$$

где  $U_n$  — потенциал  $n$ -го транспортера, который, согласно [2], определяется выражением:

$$U_n = \begin{cases} U_B \frac{\operatorname{sh} \frac{m-n+1}{2} \gamma \operatorname{sh} \frac{n}{2} \gamma}{\operatorname{sh} \frac{m}{2} \gamma \operatorname{sh} \frac{\gamma}{2}} & 1 \leq n \leq m, \\ U_B \frac{\operatorname{sh} \frac{m-n+1}{2} \gamma \operatorname{sh} \frac{2m-n}{2} \gamma}{\operatorname{sh} \frac{m}{2} \gamma \operatorname{sh} \frac{\gamma}{2}} & m+1 \leq n \leq 2m. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь

$$\gamma = \ln \frac{\sqrt{1 + \frac{4C_2}{C_3}} + 1}{\sqrt{1 + \frac{4C_2}{C_3}} - 1} \approx \ln \frac{\kappa_i + 1}{\kappa_i - 1},$$

$$\kappa_i = \frac{1}{\operatorname{th} \frac{m}{2} \gamma \operatorname{th} \frac{\gamma}{2}}$$

безразмерные коэффициенты, не зависящие от времени, в силу чего и потенциалы транспортеров не изменяются в промежутке между коммутациями.

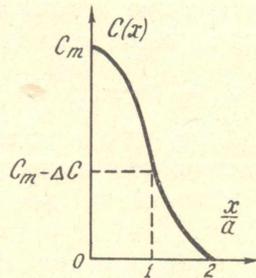


Рис. 2

Закон изменения частичной емкости транспортера относительно элемента поверхности статора определялся путем моделирования в электролитической ванне при изменении геометрии модели в пределах, соответствующих реальным конструкциям ЭСПП. Обобщенная кривая, характеризующая этот закон, показана на рис. 2. Здесь  $x$  — перемещение оси транспортера относительно середины элемента статора,  $a$  — расстояние между осями соседних транспортеров или серединами соседних элементов статора ( $x$  и  $a$  измеряются вдоль одной и той же окружности).

Очевидно, при  $t=0$

$$C_1 = C_m(x=0); C_3 = C'_3 = C_m - \Delta C(x=a); C_5 \approx 0(x=2a)$$

и при  $t=T$

$$C_1 = C_5 = C_m - \Delta C(x=a); C_3 = C_m(x=0); C'_3 \approx 0(x=2a).$$

Для упрощения дальнейших расчетов кривую рис. 2 с достаточной степенью точности можно аппроксимировать двумя прямолинейными от-

резками, общая точка которых имеет абсциссу  $x=2a$ . В этом случае можно записать:

$$\left. \begin{aligned} C_1(t) &= C_m - \Delta C \frac{t}{T} \\ C_3(t) &= C_m - \Delta C \left(1 - \frac{t}{T}\right) \\ C'_3(t) &= (C_m - \Delta C) \left(1 - \frac{t}{T}\right) \\ C_5(t) &= (C_m - \Delta C) \frac{t}{T} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

причем  $C_3 - C_0 = C_1 + C_3 + C'_3 + C_5 = 3C_m - 2\Delta C$ .

Тогда из уравнений (1—4) следует:

$$i_{ин} = -i_{ив} = [AC_m - (A - B)\Delta C] \frac{\kappa_1 U_B}{T}, \quad (5)$$

где

$$A = 3 - \frac{\operatorname{ch} \frac{m-s}{2} \gamma (2\operatorname{ch} \gamma + 1)}{\operatorname{ch} \frac{m}{2} \gamma \operatorname{ch} \frac{\gamma}{2}}; \quad B = 1 - \frac{\operatorname{ch} \frac{m-s}{2} \gamma}{\operatorname{ch} \frac{m}{2} \gamma \operatorname{ch} \frac{\gamma}{2}}.$$

Анализ последних выражений показывает, что в реальных ЭСГП выполняется условие  $A \approx 3$  и  $B \approx 1$ , тогда уравнение (5) принимает вид

$$i_{ин} = -i_{ив} = (3C_m - 2\Delta C) \frac{\kappa_1 U_B}{T} = 2m\kappa_1 (C_3 - C_0) U_B = I. \quad (6)$$

Таким образом, при кусочно-линейной аппроксимации кривой  $C(x)$  токи индукторов не зависят от времени. Однако и использование других аппроксимирующих функций дает переменную составляющую, несоизмеримую с постоянной.

### Токи в статической модели

При расчете коммутационных процессов в первом приближении пренебрегаем индуктивностью цепи (малый параметр) и нелинейностью вольт-амперной характеристики искрового разряда. Сопротивление последнего  $R = \text{const}$  будем считать одинаковым в зарядной и разрядной системах.

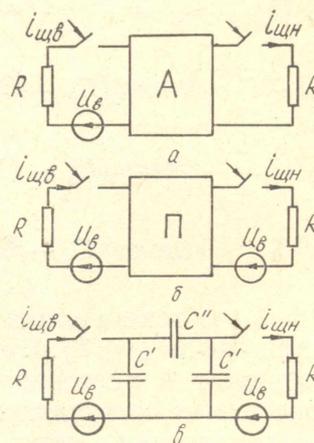


Рис. 3. Схема замещения ЭСГП при расчете коммутационного тока

Рассматривая ЭСГП как некоторый активный четырехполюсник по отношению к коммутационным промежуткам (щетка-транспортёр), получим расчетную схему, изображенную на рис. 3, а, которая, после приведения к нулевым начальным условиям, примет вид, показанный на рис. 3, б. Появившиеся в последней схеме э.д.с.  $U_B$  равны разности потенциалов между щетками и подходящими к ним транспортёрами  $m$  и  $2m$  (это следует из уравнений (3)). Параметры П-образной схемы замещения пассивного четырехполюсника (рис. 3, в) можно получить из расчетной схемы замещения ЭСГП, предложенной в [2]:

$$C' = \kappa_1 C_3 \operatorname{th}^2 \frac{m}{2} \gamma \approx \kappa_1 C_3,$$

$$C'' = \kappa_1 C_3 \frac{\operatorname{th} \frac{m}{2} \gamma}{\operatorname{sh} m \gamma} \approx 0,$$

так как для реальных ЭСГП  $\operatorname{th} \frac{m}{2} \gamma \approx 1$ , а  $\operatorname{sh} m \gamma \gg 1$ .

Тогда

$$i_{\text{щн}} = i_{\text{щв}} = \frac{U_B}{R} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (7)$$

где  $\tau = \kappa_1 C_3 R$ .

Каждый из этих токов можно представить в виде суммы двух составляющих, одна из которых замыкается токами смещения в системе транспортёры — индуктор ( $i'$ , пропорциональная величине  $C_3 = C_0$ ), другая — в системе транспортёры — заземленные элементы конструкции ЭСГП ( $i''$ , пропорциональная  $C_0$ ):

$$i' = \frac{U_B (C_3 - C_0)}{C_3 R} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (8)$$

$$i'' = \frac{U_B C_0}{C_3 R} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (9)$$

### Мгновенные и средние значения токов

При выбранных положительных направлениях токов в цепях генератора (рис. 1) их мгновенные значения в интервале  $0 \leq t \leq T$  определяются по принципу наложения с учетом формул (6—9) в виде:

$$i_{\text{щн}} = i_{\text{щз}} = i' + i'' = \frac{U_B}{R} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

$$i_{\text{ин}} = I - i' = 2m n \kappa_1 (C_3 - C_0) - \frac{U_B (C_3 - C_0)}{R C_3} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

$$i_{\text{ив}} = -I + i' = -2m n \kappa_1 (C_3 - C_0) + \frac{U_B (C_3 - C_0)}{R C_3} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

$$i_{\text{кз}} = I + i'' = 2m n \kappa_1 (C_3 - C_0) + \frac{U_B C_0}{R C_3} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

Отсюда видно, что токи в цепях щеток имеют импульсный характер (длительность импульсов  $\Delta t \ll T$ ). Остальные токи, кроме импульсной составляющей, содержат и постоянную (точнее — слабоизменяющуюся). Причем полярности этих составляющих одинаковы в токе короткого замыкания и противоположны в токах индукторов.

Средние за период  $\left( I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt \right)$  значения токов равны:

$$I_{\text{кз}} = I_{\text{щн}} = I_{\text{щв}} = 2\pi n k i C_9 U_{\text{в}},$$

$$I_{\text{ив}} = I_{\text{ин}} = 0.$$

Выражение для среднего значения тока короткого замыкания совпадает с аналогичным выражением, полученным в [2]. А равенство средних значений токов щеток и тока короткого замыкания, так же, как и равенство нулю средних значений токов индукторов, подтверждается экспериментами, описанными в [3]. Это позволяет сделать вывод о правоте принятых допущений и возможности использования вышеизложенной методики для анализа ЭСП как динамической системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Левитов, А. Г. Ляпин. Электростатические генераторы с жестким ротором ч. 1, ЦИНТИЭлектром, 1963.
2. В. А. Лукутин, В. Д. Эськов. Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», № 2, 1967.
3. А. М. Курцов, В. В. Пацевич. «Электричество», № 7, 1968.