

К ВОПРОСУ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПОТЕНЦИАЛА ПО РОТОРУ ЭСГ*

В. Д. ЭСЬКОВ

*Представлена объединенным научным семинаром кафедры ТОЭ ТПИ
и отдела роторных ЭСГ НИИ ЯФ при ТПИ*

Электростатические генераторы (ЭСГ) находят в настоящее время все большее применение в народном хозяйстве.

Принцип действия и основы конструкции ЭСГ с каскадным соединением транспортеров-проводников достаточно полно изложены в [1].

Для получения в этих генераторах наибольшего напряжения (а следовательно, и большей мощности при заданной нагрузке) необходимо иметь равномерное распределение потенциала по ротору. До некоторой степени эта задача решается при наличии на статоре полупроводящего слоя, который обеспечивает равномерность распределения потенциала по статору. Настоящая статья посвящена определению потенциалов транспортеров в генераторах этого типа, что представляет интерес с точки зрения решения вопросов коммутации и выбора оптимальной конструкции генератора.

На рис. 1 изображена принципиальная схема ЭСГ с каскадным соединением транспортеров-проводников, имеющего одну пару полюсов и полупроводящий слой на статоре. Число транспортеров генератора $2m$, при этом индукторы перекрывают s транспортеров каждый (s — нечетное число), а щетки — по одному транспортеру. Возможны две схемы возбуждения: кондукционная (низковольтные индукторы заземлены, а щетка подключена к источнику возбуждения с напряжением U_B , другой зажим которого также заземлен) и индукционная (заземлена щетка, а индукторы соединены с источником возбуждения). Нагрузка подключена одним выводом к высоковольтным индукторам и щетке, а другой заземлен. Полупроводящий слой на статоре изображен в виде делителя напряжения, число ступеней которого $m - s + 1$, а падение напряжения на каждой ступени U_0 . Погрешность от такой замены не превышает 5% при $m - s \geq 5$ [2].

В момент отрыва транспортеров I и $m + 1$ от соответствующих щеток транспортеры $1, 2, \dots, m$ имеют заряд q , а транспортеры $m + 1, m + 2, \dots, 2m$ — заряд q' . Разность этих зарядов отдается в нагрузку, причем ток I_{II} , протекающий в нагрузке, создает на ней падение напряжения U_{II} .

* Работа выполнена под руководством к. т. н. Лукутина В. А.

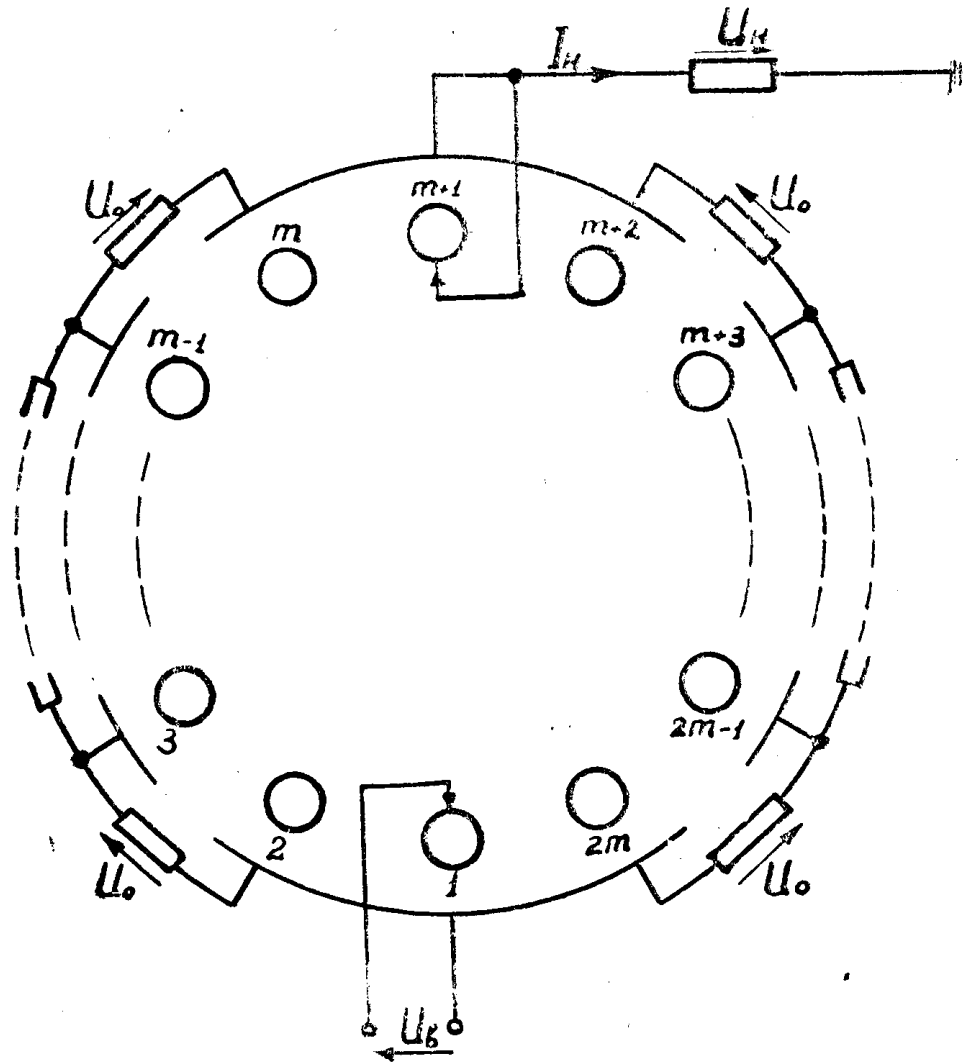


Рис. 1. Принципиальная схема ЭСГ с каскадным соединением транспортеров-проводников.

Электрическое поле в ЭСГ удовлетворяет условиям квазистационарности, поэтому их исследование может проводиться с помощью уравнений электростатики.

Рассматривая ЭСГ как систему проводящих тел, можно на основе уравнений с частичными емкостями составить схему замещения генератора, элемент которой представлен на рис. 2. Здесь C_1 — частичная емкость транспортера относительно противолежащего элемента статора, C_2 — относительно соседнего транспортера, C_3 — относительно элемента статора, противолежащего соседнему транспортеру, C_4 — относительно заземленных элементов конструкции генератора. При этом не учитываются остальные частичные емкости и предполагается, что диэлектрическая проницаемость среды, окружающей транспортеры, не зависит от напряженности электрического поля и что отсутствуют утечки по изоляции и потери на корону.

Решить задачу определения потенциалов транспортеров кратчайшим путем можно с помощью метода электростатической аналогии. Заменяем частичные емкости проводимостями: C_1 на $2g_1$, C_2 на g_2 , C_3 на g_3 , C_4 на $2g_4$; напряжению источника возбуждения и падениям на-

пряжения на ступенях делителя будут соответствовать источники напряжения U_B и U_0 , а зарядам q и q' — источники тока I и I' . В результате вместо схемы замещения с частичными емкостями получается для кондукционной схемы возбуждения цепная схема из шестиполюсников, приведенная на рис. 3. При этом $s - 1$ шестиполюсников как со стороны возбуждения, так и со стороны нагрузки будут пассивными, а остальные — активными. Схема активного шестиполюсника изображена на рис. 4, а пассивный отличается от него отсутствием источника напряжения U_0 .

I Определим в этой схеме потенциал n -ого транспортера и ток I_B и I_K . Расчет будем вести методом наложения.

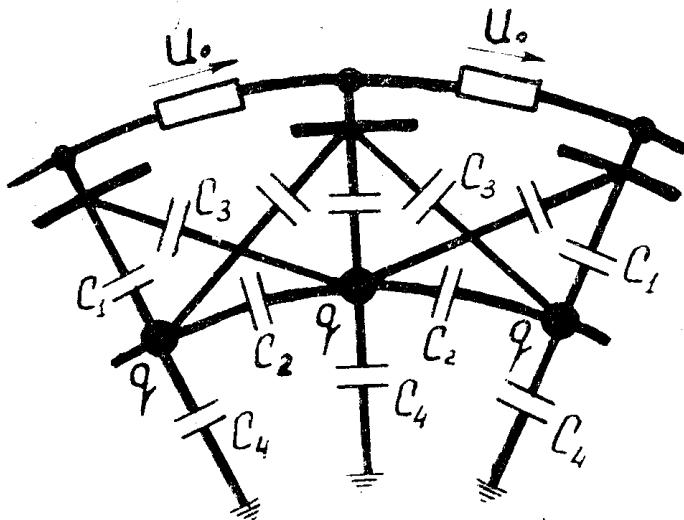


Рис. 2. Элемент схемы замещения генератора.

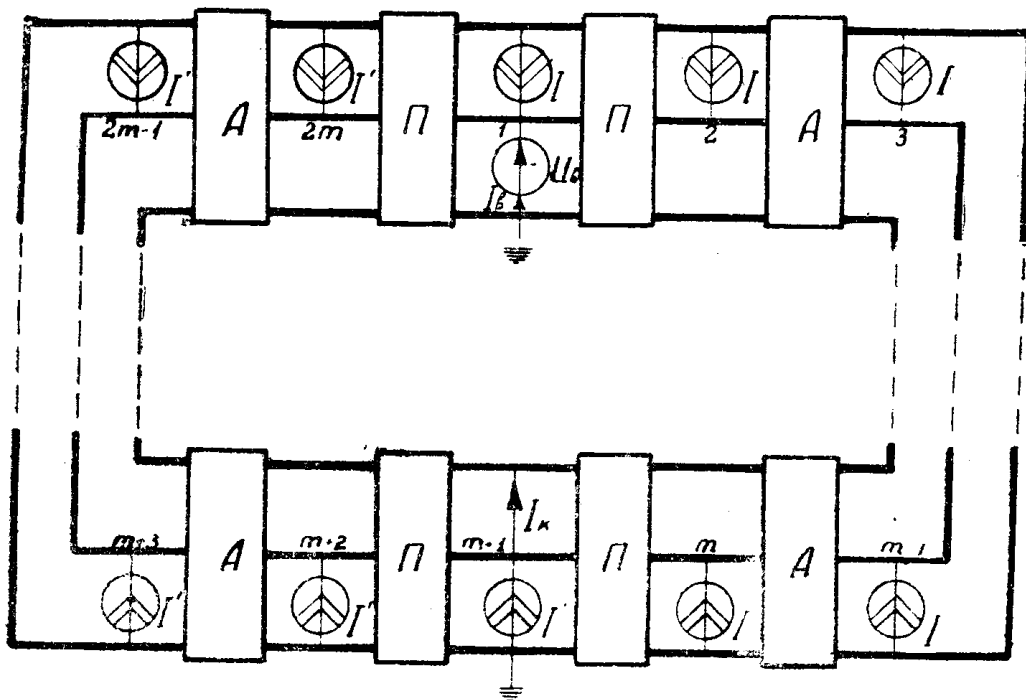


Рис. 3. Расчетная цепная схема.

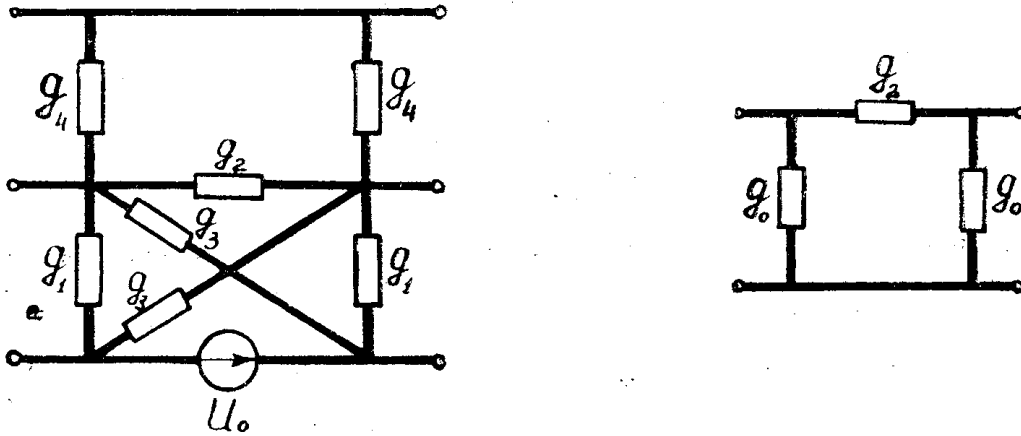


Рис. 4. Схемы активного шестиполюсника и пассивного четырехполюсника.

При определении составляющих названных выше величин от U_B , I и I' схема рис. 3 довольно просто приводится к цепной схеме из пассивных четырехполюсников (схема такого четырехполюсника приведена на рис. 4), и расчет ведется по известным формулам теории цепей [3]. Ту же схему можно получить и при расчете составляющих от U_0 , последовательно применяя принцип взаимности и условие эквивалентности источников энергии [3].

В результате расчета получаются следующие выражения:

а) для потенциала n -ого транспортера при $1 \leq n \leq m+1$

$$U_n = U_B \frac{\text{sh}(m-n+1)}{\text{sh}m\beta} + \frac{I\beta}{2g_0} \left[1 - \frac{\text{ch}\left(\frac{m}{2} - n + 1\right)\beta}{\text{ch}\frac{m\beta}{2}} \right] + U_{no}, \quad (1)$$

где

$$U_{no} = \begin{cases} \frac{U_H \text{sh}(n-1)\beta}{g_0 \text{sh}m\beta} (g_4 + g_5) \text{ при } 1 \leq n \leq \frac{s+1}{2}, \\ \frac{U_H}{g_0} \left[(g_0 - g_4) \frac{n - \frac{s+1}{2}}{m-s+1} + g_4 \frac{\text{sh}(n-1)\beta}{\text{sh}m\beta} + \right. \\ \left. + g_5 \frac{\text{sh}\frac{s-1}{2}\beta \text{sh}\left(\frac{m}{2} - n + 1\right)\beta}{\text{sh}\frac{m-s+1}{2}\beta \text{sh}m\beta} \right] \text{ при } \frac{s+1}{2} \leq n \leq m - \frac{s-3}{2}, \\ \frac{U_H}{g_0} \left[g_0 - g_4 + g_4 \frac{\text{ch}\left(\frac{m}{2} - n + 1\right)\beta}{\text{ch}\frac{m\beta}{2}} - \right. \\ \left. - (g_4 + g_5) \frac{\text{sh}(m-n+1)\beta}{\text{sh}m\beta} \right] \text{ при } m - \frac{s-3}{2} \leq n \leq m+1, \end{cases}$$

$$U_H = U_0 (m - s + 1), \quad g_5 = \frac{2(g_1 + g_3 \operatorname{ch} \beta)}{(m - s + 1) \operatorname{sh} \beta} \operatorname{ch} \frac{m\beta}{2} \operatorname{sh} \frac{m - s + 1}{2} \beta,$$

$$\beta = \ln \frac{\sqrt{1 + \frac{2g_2}{g_0} + 1}}{\sqrt{1 + \frac{2g_2}{g_0} - 1}}, \quad g_0 = g_1 + g_3 + g_4;$$

при $m + 1 \leq n \leq 2m + 1$ справедлива формула (1), если в ней заменить I на I' и n на $n' = 2m + 2 - n$;

б) для токов I_B и I_K

$$I_B = \frac{2g_0 U_B \operatorname{ch} m\beta - 2U_H (g_4 + g_5)}{\operatorname{th} \frac{\beta}{2} \operatorname{sh} m\beta} - \frac{I + I'}{\operatorname{sh} m\beta} \sum_{k=1}^{m-1} \operatorname{sh} k\beta - I, \quad (2)$$

$$I_K = \frac{2g_0 U_B - 2U_H (g_4 \operatorname{ch} m\beta + g_5)}{\operatorname{th} \frac{\beta}{2} \operatorname{sh} m\beta} + \frac{I + I'}{\operatorname{sh} m\beta} \sum_{k=1}^{m-1} \operatorname{sh} k\beta + I'. \quad (3)$$

Поскольку заряды связаны с соответствующими разностями потенциалов лишь через частичные емкости, то токи к узлам I и $m + 1$ могут подтекать лишь по проводимостям g_1, g_2, g_3 и g_4 , откуда следует равенство нулю токов I_B и I_K . Тогда из уравнений (2) и (3) определяются токи I и I' в следующем виде:

$$I = g_0 U_B + g_4 U_H + \Delta I, \quad (4)$$

$$I' = g_0 U_B + g_4 U_H - \Delta I, \quad (5)$$

где

$$\Delta I = \frac{1}{\operatorname{th} \frac{\beta}{2} \operatorname{th} \frac{m\beta}{2}} \left[g_0 U_B - U_H \left(g_4 + \frac{g_5}{\operatorname{ch}^2 \frac{m\beta}{2}} \right) \right].$$

Если теперь подставить значения I и I' в уравнение (1) и заменить проводимости на соответствующие емкости, то получим окончательную формулу для потенциала n -ого транспортера генератора при кондукционной схеме возбуждения:

$$\frac{U_n}{U_B} = f_1 \left(1 - \frac{U_H}{k_u U_B} \right) + \frac{U_H}{U_B} \left[f_2 + f_3 \frac{C_4}{C_0} + \frac{1 + f_4}{2} \left(\frac{1}{k_u} - \frac{C_4}{C_0} \right) \right] \quad (6)$$

Значения коэффициентов f_1, f_2, f_3 и f_4 сведены в таблицу 1, а

$$\frac{1}{k_u} = \frac{C_4}{C_0} + \frac{2(C_1 + 2C_3 \operatorname{ch} \gamma) \operatorname{sh} \frac{m - s + 1}{2}}{C_0 (m - s + 1) \operatorname{sh} \gamma \operatorname{ch} \frac{m\gamma}{2}},$$

где $C_0 = C_1 + 2C_3 + C_4$, а $\gamma = \ln \frac{\sqrt{1 + \frac{4C_2}{C_0} + 1}}{\sqrt{1 + \frac{4C_2}{C_0} - 1}}$.

Смысл коэффициента k_u можно пояснить следующим образом. Заменив в уравнениях (4) и (5) I на q , I' на q' и проводимости g_1, g_2, g_3 и g_4 соответственно на частичные емкости $\frac{C_1}{2}, C_2, C_3, \frac{C_4}{2}$, найдем разность зарядов:

$$q - q' = k_i C_0 U_B \left(1 - \frac{U_H}{k_u U_B} \right), \quad (7)$$

где

$$\frac{1}{k_i} = \text{th} \frac{\gamma}{2} \text{th} \frac{m\gamma}{2}.$$

Поскольку ток в нагрузке определяется как

$$I_H = 2mn(q - q'), \quad (8)$$

где n — число оборотов ротора в секунду, то из уравнений (7) и (8) получаем выражение для внешней характеристики генератора:

$$I_H = k_i I_0 \left(1 - \frac{U_H}{k_u U_B} \right), \quad (9)$$

где $I_0 = 2mnC_0 U_B$.

Отсюда видно, что при $I_H = 0$ $k_u = \frac{U_{xx}}{U_B}$ и может быть назван

коэффициентом увеличения напряжения, а при $U_H = 0$ $k_i = \frac{I_{кз}}{I_0}$ и может быть назван коэффициентом естественной перезарядки (при $C_2 \rightarrow 0, I_{кз} = I_0$) [4].

Расчет генератора с индукционной схемой возбуждения полностью подобен вышеизложенному (только в схеме рис. 3 следует заземлить другой полюс источника напряжения U_B).

В результате имеем:

$$\begin{aligned} \frac{U'_H}{U_B} = f_1 \left[1 - \left(1 + \frac{U_H}{U_B} \right) \frac{1}{k_u} \right] + \left(1 + \frac{U_H}{U_B} \right) \left[f_2 + f_3 \frac{C_4}{C_0} + \right. \\ \left. + \frac{1+f_2}{2} \left(\frac{1}{k_u} - \frac{C_4}{C_0} \right) \right] - 1. \end{aligned} \quad (10)$$

В этом случае изменятся коэффициент увеличения напряжения ($k'_u = k_u - 1$) и коэффициент естественной перезарядки

$$\left(k'_i = k_i \frac{k'_u}{k_u} \right).$$

Исследование уравнений (6) и (10) позволяет сделать некоторые выводы. В режимах работы, близких к холостому ходу генератора, наибольшая разность потенциалов между соседними транспортерами обычно меньше величины U_0 . В режимах же, близких к режиму короткого замыкания, наибольшая разность потенциалов существует между транспортерами m и $m+1$, а также между 1 и $2m$. Это подтверждается и экспериментально: наблюдения за зоной коммутации на генераторах, выполненных в Томском политехническом институте, показывают, что в пространстве между этими транспортерами и

Таблица 7

Границы	f_1	f_2	f_3	f_4
$1 \leq n \leq \frac{s+1}{2}$		0	1	$\text{ch}(n-1) \gamma$
$\frac{s+1}{2} \leq n \leq m - \frac{s-3}{2}$	$\frac{\text{sh} \frac{m-n+1}{2} \gamma \text{sh} \frac{n\gamma}{2}}{\text{sh} \frac{m\gamma}{2} \text{sh} \frac{\gamma}{2}}$	$n \frac{\frac{s+1}{2}}{m-s+1}$	$\frac{m-n-\frac{s-3}{2}}{m-s+1}$	$\frac{\text{ch} \frac{s-1}{2} \gamma \text{sh} \left(\frac{m}{2} - n + 1 \right) \gamma}{\text{sh} \frac{m-s+1}{2} \gamma}$
$m - \frac{s-3}{2} \leq n \leq m+1$		1	0	$-\text{ch}(m-n+1) \gamma$
$m+1 \leq n \leq m+1$		1	0	$-\text{ch}(n-m+1) \gamma$
$m + \frac{s+1}{2} \leq n \leq 2m - \frac{s-3}{2}$	$\frac{\text{sh} \frac{n-m-1}{2} \gamma \text{sh} \frac{2m-n}{2} \gamma}{\text{sh} \frac{m\gamma}{2} \text{sh} \frac{\gamma}{2}}$	$2m-n-\frac{s-3}{2}$	$\frac{n-m-\frac{s+1}{2}}{m-s+1}$	$\frac{\text{ch} \frac{s-1}{2} \gamma \text{sh} \left(n-1-\frac{3m}{2} \right) \gamma}{\text{sh} \frac{m-s+1}{2} \gamma}$
$2m - \frac{s-3}{2} \leq n \leq 2m+1$		0	1	$\text{ch}(2m+1-n) \gamma$

щеткой возникает корона тем более интенсивная, чем меньше напряжение на выходе генератора.

Таким образом, полученные уравнения позволяют оценить неравномерность распределения потенциала по ротору ЭСГ и выявить участки с наибольшей напряженностью электрического поля при заданных частичных емкостях и числе транспортеров. С другой стороны, можно выбрать оптимальные соотношения последних величин при заданной внешней характеристике генератора и рабочей точке на ней. Кроме того, предложенная методика расчета позволяет учесть и ряд особенностей конструкции ЭСГ (наличие нескольких пар полюсов, перекрытие щеткой нескольких транспортеров, смещение ее относительно середины индуктора и т. д.). Моделирование поля всего генератора — весьма сложная проблема; знание потенциалов транспортеров позволяет осуществить моделирование отдельных его участков (например, зоны коммутации). После разработки достаточно простой методики определения частичных емкостей этот расчет может быть использован в инженерном расчете генератора. Нужно отметить также, что этот метод расчета применим и к расчету распределения потенциала по гирлянде изоляторов и в некоторых типах разрядников.

ЛИТЕРАТУРА

1. И о ф ф е А. Ф. Электростатический генератор, ЖТФ, 9, № 23, 1939.
2. Г е р н ш т е й н Г. М., С а л и й И. Н. О дискретной аппроксимации непрерывной функции на границе области при электрическом моделировании, «Электричество», № 11, 1963.
3. З е в е к е Г. В., И о н ц и н П. А., Н е т у ш и л А. В., С т р а х о в С. В. Основы теории цепей, Госэнергоиздат, стр. 15, 35, 249, 1963.
4. П а ц е в и ч В. В. Некоторые вопросы теории и расчета ЭСГ с транспортерами-проводниками. Диссертация, г. Томск, 1964.