

ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СООТНОШЕНИИ МЕЖДУ СТЕРЖНЕВЫМИ ЭСГ И ЭСГ С ТРАНСПОРТЕРОМ-ДИЭЛЕКТРИКОМ

А. Ф. КАЛГАНОВ

(Представлена научным семинаром кафедры теоретических основ электротехники
и сектора роторных ЭСГ НИИ ЯФЭА)

Как показано в [1], мощность электростатических генераторов с транспортерами-проводниками в виде стержней, расположенных внутри диэлектрического тела ротора (ЭСГС), теоретически может быть приближена к мощности электростатического генератора с транспортером-диэлектриком (ЭСГД), если ротор ЭСГС несет достаточно большое число стержней малого диаметра при прочих равных условиях. Однако, если в ЭСГД рабочей поверхностью является лишь одна из двух поверхностей диска или стенки цилиндрического ротора, то в ЭСГС в качестве рабочих могут быть использованы обе поверхности, если применить второй статор. Применение второго статора практически не увеличивает габариты ЭСГС, мощность же генератора в идеальном случае возрастает вдвое. Это послужило стимулом для дальнейшего интенсивного исследования генераторов такого типа. Была предложена методика расчета ЭСГС на основе уравнений с частичными емкостями [2, 3]. Более совершенной оказалась методика по [3], позволяющая в аналитической форме выразить линейные участки характеристики короткого замыкания и нагрузочной характеристики в зависимости от геометрии системы (величины газового зазора ротор — статор d_1 , глубины залегания стержней в диэлектрическом теле ротора d_2 , расстояния между осями стержней a , радиуса стержней r , числа транспортеров на пару полюсов $2m$, числа транспортеров, «перекрываемых» индукторами), электрофизических свойств ротора (относительной диэлектрической проницаемости материала ротора ϵ_r), условий коммутации (узкие или широкие щетки), электрической схемы работы генератора (индукционной или кондукционной схем возбуждения, числа пар полюсов p и т. п.).

Как показали расчеты, подтвержденные впоследствии экспериментом, стержневым ЭСГ свойственно явление, аналогичное дополнительному естественному самовозбуждению в ЭСГД, названное естественной перезарядкой в ЭСГС [4]. Это указало на наличие глубокой аналогии между процессами, происходящими в ЭСГС и ЭСГД.

Исследование физических процессов, сопровождающих работу ЭСГС, показало [5], что в ЭСГС, как и в ЭСГД, имеет место двойной естественный перенос зарядов. Это устранило необходимость применять искусственную перезарядку в ЭСГС с целью удвоения тока.

В проведенных работах, однако, не затрагивался вопрос об уровне максимального тока в ЭСГС и условиях его приближения к уровню максимального тока ЭСГД. Дальнейшими исследованиями было пока-

зано [6], что, как и в ЭСГД, максимальный ток к. з. ЭСГС определяется величиной, достижимой для данных условий нормальной составляющей напряженности электрического поля в газовом зазоре ротор — статор и не зависит от степени естественной перезарядки.

При расчете ЭСГД исходят из того, что заряды на поверхности ротора распределяются равномерно, и это соответствует представлению о равномерности электрического поля в газовом зазоре ротор — статор. В ЭСГС же за счет дискретного распределения зарядов, сосредоточенных на стержневых транспортерах, поле неравномерно. Однако расположение транспортеров внутри диэлектрического тела ротора делает неравномерность поля слабо выраженной, если глубина залегания транспортеров сравнительно велика (по отношению к величине газового зазора) [7]. В связи с этим становится возможным представить распределение зарядов в ЭСГС не дискретным, а как бы по всей поверхности ротора и определить среднюю максимальную «поверхностную» плотность заряда как

$$\sigma'_m = \gamma \sigma_m = \epsilon_0 E'_{\text{пред}} = \gamma \epsilon_0 E_{\text{пред}} = \gamma \epsilon_0 E_{\text{пр}},$$

где σ'_m — максимальная поверхностная плотность заряда в ЭСГД (усредненная величина);

$E'_{\text{пред}}$ — среднее предельно допустимое значение нормальной составляющей напряженности электрического поля E_n в ЭСГД, которое в расчетах обычно принимается равным электрической прочности рабочей среды $E_{\text{пр}}$;

$E'_{\text{пред}}$ — среднее предельно допустимое значение E_n в ЭСГС;

$\gamma < 1$ — коэффициент, характеризующий степень равномерности распределения заряда по поверхности ротора, или степень равномерности электрического поля в газовом зазоре ЭСГС.

Тогда выражение для максимального тока к. з. ЭСГС, имеющего двойной статор, по аналогии с выражением для тока к. з. ЭСГД запишется как

$$I'_{\text{к.з.}_0} = 2\sigma'_m \cdot 2S_{\text{геом}} \cdot n \cdot p = 2\gamma \sigma_m \cdot 2S_{\text{геом}} \cdot n \cdot p,$$

или

$$I'_{\text{к.з.}_0} = 2I_{\text{к.з.}_0} \cdot \gamma, \quad (1)$$

где $I_{\text{к.з.}_0} = 2\sigma_m S_{\text{геом}} n \cdot p$ — максимальный ток к. з. ЭСГД,

$S_{\text{геом}}$ — рабочая геометрическая поверхность одной стороны ротора ЭСГС и ЭСГД,

n — число оборотов ротора в секунду.

С другой стороны, анализ выражения для максимального тока к. з. ЭСГС на основе представлений, изложенных в [6], показывает, что оно может быть записано в форме

$$I'_{\text{к.з.}_0} = 2I_{\text{к.з.}_0} \cdot \frac{C_{\text{рс}}}{C_{\text{рс}_0}} = 2I_{\text{к.з.}_0} \cdot \kappa_0, \quad (2)$$

где $\kappa_0 = \frac{C_{\text{рс}}}{C_{\text{рс}_0}} > 1$ — коэффициент, меньший единицы, учитывающий степень приближения величины действительной емкости системы транспортеров ротора ЭСГС относительно статора к величине максимально возможной емкости $C_{\text{рс}_0}$ (для данных условий). Последняя равна удвоенной величине емкости системы ротор—статор ЭСГД в эквивалентных условиях и определяется как

$$C_{\text{рс}_0} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \cdot 2S_{\text{геом}}}{d_{\text{пр}}},$$

где $d_{пр} = d_2 + \varepsilon_{r_2} d_1$ — приведенный зазор ротор—статор. Коэффициент κ_0 в известной мере характеризует „заполняемость“ ротора транспортерами и в этом смысле может быть назван коэффициентом заполнения.

Сравнивая (1) с (2), находим:

$$\gamma = \kappa_0.$$

Полученный результат позволяет сделать следующие выводы:

1. В соответствии с исходными условиями степень приближения ЭСГС к ЭСГД (по максимальному току к.з.) численно определяется коэффициентом заполнения транспортерами диэлектрического тела ротора κ_0 , определяемого отношением емкостей системы ротор-статор ЭСГС и ЭСГД в эквивалентных условиях.

2. В этих же условиях коэффициент заполнения κ_0 одновременно характеризует степень равномерности электрического поля в зазоре ЭСГС.

Для частного случая двухрядного расположения стержней и ограниченного диапазона изменения геометрических параметров ротора ЭСГС в [3] получена эмпирическая формула для определения величины $C_{рс}$. С использованием этой формулы выражение для κ_0 принимает вид:

$$\kappa_0 = \frac{2\pi d_{пр}}{a \ln \left[2 \left(\frac{d_{пр}}{r} + 1 \right) \right]} \left[1 - e^{-\frac{a}{2r} \left(\frac{0.9r}{d_{пр}+r} + 0.02 \right)} \right]. \quad (3)$$

В (3) входят уже упоминавшиеся величины a , r и $d_{пр}$.

Из (3) следует, что для приближения величины κ_0 к единице (а именно это нас в первую очередь и интересует) необходимо увеличивать значения $d_{пр}$ и r и уменьшать величину a . Это хорошо согласуется с существующими представлениями о характере влияния входящих в (3) величин на степень равномерностей электрического поля в системе электронов, аналогичной системе ротор—статор ЭСГС.

Детальный анализ (3) показывает, что при заданных значениях газового зазора d_1 и расстояния между осями транспортеров a величины $d_{пр}$ и r имеют «оптимум». Под «оптимальными» $d_{пр}$ и r понимаются такие их значения, выше которых зависимость κ_0 от $d_{пр}$ и r становится слабовыраженной. Так, при d_1 порядка десятых долей миллиметра оптимальная величина $d_{пр}$ составляет не более нескольких миллиметров.

Величина a , в соответствии с (3), должна быть как можно меньше. Пределом ее минимальной величины является $a = 2r$, когда стержни располагаются вплотную друг к другу ($a - 2r = 0$). Очевидно, что это нереальный случай.

Как следует из данных [3], максимальная разность потенциалов между стержнями имеет место при работе ЭСГС в режиме к.з. и по величине равна напряжению возбуждения U_b . Это напряжение прикладывается к промежутку $a - 2r$. Отсюда следует, что выбор величины a должен производиться из условия недопущения пробоя между стержнями как по поверхности коллекторной части, так и в толще диэлектрического тела ротора. Очевидно, величина a должна быть не меньше определенного значения (для данных условий). Она будет тем меньше, чем меньше будет максимальная величина U_b , определяемая величиной $d_{пр}$. С этих позиций необходимо иметь минимальным значение $d_{пр}$. Этим еще раз подтверждается необходимость обеспечения в ЭСГС минимальных газовых зазоров ротор—статор d_1 (при сохранении оптимального соотношения между d_1 и $d_{пр}$), поскольку при этом повышается уровень тока $2I_{к.з.}$ и одновременно увеличива-

ется степень приближения к нему тока $I'_{к.з.0}$ за счет уменьшения оптимальной величины a . Однако этот путь весьма ограничен, поскольку в любом случае напряжение возбуждения составляет десятки киловольт.

Следует также отметить, что стремление к уменьшению a может пагубно отразиться на нагрузочных характеристиках, так как это ведет к увеличению влияния паразитных емкостей в ЭСГС. Сохранение же больших значений a является причиной того, что величина k_0 оказывается заметно меньше единицы.

Изложенные результаты получены на основе анализа частного исполнения ЭСГС и без учета многих других факторов. Их проверка и уточнение, равно как и дальнейшее обобщение, должны быть проведены на основе всестороннего исследования электрического поля роторов различного исполнения с использованием опытных данных по исследованию экспериментальных образцов ЭСГС.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Калганов, В. В. Пацевич. Изв. вузов, Электромеханика, № 8, 917, 1963.
2. В. В. Пацевич. Некоторые вопросы теории и расчета ЭСГ с транспортерами-проводниками. Диссертация, Томск, 1964.
3. Э. Д. Эськов. Исследование электростатических генераторов с каскадным соединением транспортеров-проводников. Диссертация, Томск, 1966.
4. А. П. Кононов, В. В. Пацевич, В. Д. Эськов. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, № 4, 52, 1967.
5. А. М. Купцов. Физические процессы в электростатических генераторах с проводящими транспортерами, помещенными в диэлектрик. Диссертация, Томск, 1967.
6. А. Ф. Калганов, Ю. Н. Сивков. Изв. ТПИ, т, 193, 1968.
7. N. J. Felici. Ann. telecomm. № 9, 44. 1954.