

К АНАЛИЗУ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ЭСГПД

В. В. ПАЦЕВИЧ, В. Д. ЭСЬКОВ, И. П. ГУК

(Представлена научным семинаром кафедры теоретических основ электротехники
и лаборатории роторных ЭСГ НИИ ЯФ)

Характеристика короткого замыкания электростатических генераторов с транспортерами-проводниками, помещенными в диэлектрик, (ЭСГПД), при контактной коммутации имеет вид, показанный на рис. 1 (кривая 1). На начальном линейном участке характеристики величина тока ЭСГПД с одной парой полюсов определяется по известному уравнению

$$I_{кз} = 2mn(q - q'), \quad (1)$$

где $2m$ — число транспортеров ротора,
 q и q' — заряды транспортера при его прямом ходе (от щетки возбуждения к щетке нагрузки) и обратном (от щетки нагрузки к щетке возбуждения) соответственно.

n — число оборотов ротора в сек

Величины зарядов q и q' можно определить, используя уравнения электростатики с потенциальными коэффициентами, коэффициентами электростатической индукции, частичными емкостями, с соответствующим образом введенными обобщенными емкостями или при непосредственном расчете электрического поля генератора.

Если последнее известно, то заряды транспортеров можно найти по теореме Гаусса в интегральной форме. Выбирая поверхность интегрирования, частью совпадающей с диэлектрической поверхностью ротора S , а частью перпендикулярной к последней так, чтобы охватить транспортеры только прямого или только обратного хода, получим с достаточной точностью

$$mq = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E'_{n\text{ ср}} S,$$

$$mq' = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E''_{n\text{ ср}} S,$$

тогда

$$I_{кз} = n \varepsilon_0 S (E'_{n\text{ ср}} - E''_{n\text{ ср}}), \quad (2)$$

где

$E'_{n\text{ ср}}$ и $E''_{n\text{ ср}}$ — среднее значение нормальной составляющей напряженности электрического поля на поверхности ротора соответственно в областях прямого и обратного хода транспортера.

Уравнение (2) устанавливает линейную зависимость тока генератора от напряженности электрического поля в зазоре ротор — статор. В тех случаях, когда максимальное значение тока короткого замыкания

генератора ограничивается разрядами в зазоре ротор — статор [1], данное уравнение позволяет определить также предельное значение тока.

Действительно, зазор ротор — статор можно рассматривать как щель, ограниченную одним или двумя диэлектрическими барьерами, для которой предельное значение напряженности поля E_k равно электрической прочности соответствующих промежутков между металлическими электродами при равномерном электрическом поле [2,3].

Полагая $E_{n\text{ ср}} = -E_{n\text{ ср}} = E_k$, предельное значение тока генератора получим равным

$$I_{\text{пред}} = 2nS \varepsilon_0 E_k. \quad (3)$$

Характеристика короткого замыкания по уравнениям (2) и (3) представляется двумя прямолинейными отрезками (ломаная 2, рис. 1).

Действительное поле в зазоре из-за дискретного распределения зарядов, переносимых транспортерами, а также под влиянием целого ряда других факторов будет неравномерным. При этом средние значения напряженности электрического поля будут ниже соответствующих максимальных значений E_{max} и E'_{max} , которые в свою очередь не могут превысить значения E_k . Для практического использования уравнения (3) при расчете и анализе характеристик короткого замыкания, даже при известных значениях E_k и E_{max} , необходимо знать зависимость E_{max} от величины напряжения возбуждения генератора и определить условия, при которых величина максимального тока достигается при практически приемлемых величинах напряжения возбуждения. Как показывает анализ результатов исследований, приведенных в работах [4, 5, 6], напряженности электрического поля и потенциалы транспортеров в режиме короткого замыкания достигают наибольших значений в средней части как области прямого хода транспортеров, так и в области обратного хода. Преобразуя выражения, полученные в [6], с учетом упрощения для коэффициента естественной перезарядки k_i , сделанного в [7], для потенциалов соответствующих транспортеров имеем

$$U'_{\text{тр}} = 0,5 (1 + k_i) U_b, \quad (4)$$

$$U''_{\text{тр}} = 0,5 (1 - k_i) U_b. \quad (5)$$

Принимая потенциал на поверхности диэлектрика ротора в области максимальных значений напряженности равным

$$U_{\text{max}} = K_p U_{\text{тр}}, \quad (6)$$

максимальное значение напряженности с достаточно высокой степенью точности можно определить как

$$E_{\text{max}} = \frac{U_{\text{max}}}{\delta}. \quad (7)$$

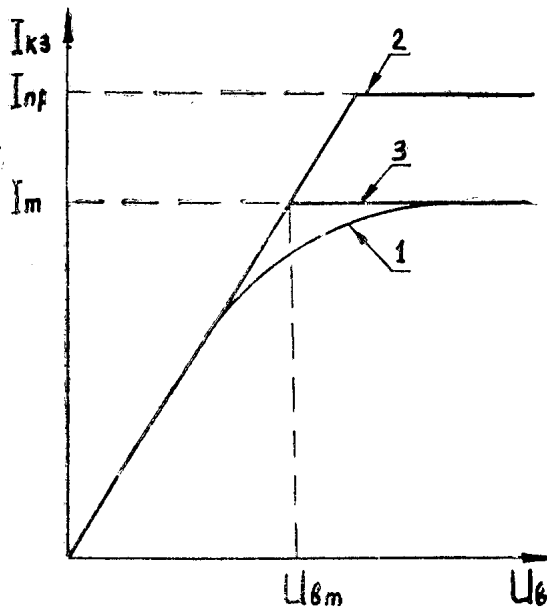


Рис. 1

Здесь k_p — коэффициент, зависящий от геометрии ротора и электрических характеристик диэлектрика ротора;

δ — величина зазора ротор—статор.

Как видно из уравнений (4) — (7), напряженность поля в зоне прямого хода транспортеров больше, чем в зоне транспортеров обратного хода, по абсолютной величине, а знаки напряженностей противоположны. Следовательно, предельное значение напряженности в первую очередь достигается в зоне прямого хода транспортеров.

Обозначая напряжение возбуждения, при котором $E'_{\max} = E_k$, через $U_{вк}$, из (4) (6) и (7) получим

$$E'_{\max} = k_p \frac{k_i + 1}{2\delta} U_{вк} = E_k. \quad (8)$$

При $U_{в} > U_{вк}$ в зазоре в области прямого хода транспортеров возникает электрический разряд, подобный разряду в диэлектрической щели. На поверхность диэлектрика в процессе разряда будет осаждаться заряд обратного знака по отношению к заряду транспортера. Поэтому в зоне максимальной напряженности величина последней будет оставаться постоянной и примерно равной E_k , если напряжение зажигания $E_{кз}$ и напряжение погасания разряда $E_{пк}$ отличаются незначительно. В настоящее время нет достаточно обоснованных данных о соотношении величин $E_{зк}$ и $E_{пк}$ даже для щелей с однородным полем. Поскольку изменение абсолютного значения E_k не влияет на качественную сторону рассматриваемых явлений, то в дальнейшем будем считать величину E_k равной максимальной напряженности поля, при которой происходит погасание разряда в диэлектрической щели, аналогичной зазору ротор — статор.

При наличии зарядов на диэлектрической поверхности ротора линейность характеристики короткого замыкания сохранится до тех пор, пока напряженность поля в зоне обратного хода транспортеров не достигает величины $-E_k$ [1]. Полагая проводимость диэлектрика ротора равной нулю, можно утверждать, что после осаждения зарядов на диэлектрическую поверхность ротора при $U_{в} = \text{const} > U_{вк}$ ионизационные процессы в зазоре прекратятся и к рассматриваемой системе при расчете поля будет применим принцип наложения. Результирующая максимальная напряженность поля определится как алгебраическая сумма двух составляющих. Первая — только от зарядов транспортеров E_m , которую можно найти по формулам (6), (7); вторая — только от заряда на поверхности диэлектрика $E_{\sigma m}$. При подсчете E_m следует учитывать, что результирующие потенциалы транспортеров и при наличии поверхностного заряда описываются уравнениями (4), (5). Поэтому, обозначая составляющую этих потенциалов от заряда на поверхности диэлектрика U_{σ} , получим для областей прямого и обратного хода

$$E'_{\max} = \frac{k_p}{\delta} \left(\frac{1 + k_i}{2} U_{в} - U_{\sigma} \right) + E_{\sigma m} = E_k, \quad (9)$$

$$E''_{\max} = \frac{k_p}{\delta} \left(\frac{1 - k_i}{2} U_{в} - U_{\sigma} \right) + E_{\sigma m}. \quad (10)$$

При дальнейшем повышении напряжения возбуждения и в зоне обратного хода транспортеров будут достигнуты критические градиенты, т. е. $E''_{\max} = -E_k$. Обозначая соответствующее напряжение возбуждения $U_{вм}$ и вычитая уравнение (10) из (9), получим

$$E'_{\max} - E''_{\max} = E'_m - E''_m = \frac{k_p k_i}{\delta} U_{вм} = 2E_k,$$

откуда

$$E_k = \frac{K_p K_i U_{vm}}{2\delta}. \quad (11)$$

Сопоставление выражений (8) и (11) дает

$$U_{vm} = \left(1 + \frac{1}{K_i}\right) U_{vk}, \quad (12)$$

т. е. напряжение возбуждения, при котором достигается E_k на обратном ходе не более чем в два раза, может превосходить напряжение, при котором возникает ионизация на прямом ходе транспортеров (случай с $K_i = 1$).

При $U_v > U_{vm}$ в зазоре идут периодические или постоянные ионизационные процессы, в результате которых в области прямого хода транспортеров происходит осаждение зарядов на диэлектрическую поверхность ротора, а в области обратного хода их компенсация. Качественно эти процессы будут аналогичны процессам в диэлектрической щели при периодически изменяющемся напряжении (например, синусоидальном с наложенной постоянной составляющей). Ток генератора в этом случае не увеличивается [1].

Для определения максимального тока короткого замыкания необходимо установить связь между E'_{cp} и E''_{cp} , которые определяют величины зарядов q и q' , и соответствующими максимальными напряженностями.

Если разделить ротор на одинаковые ячейки, число которых равно числу транспортеров, то, как показывает анализ картин поля, заряды транспортеров определяются по теореме Гаусса наиболее просто при выборе поверхностей интегрирования, совпадающих с границами ячеек, равноудаленных от зон коммутации: с одной стороны, именно в этих ячейках, как отмечалось выше, достигаются максимальные значения напряженности, а с другой стороны — средняя напряженность для всей поверхности ячейки равна средней напряженности на поверхности диэлектрика (без учета потока вектора E в направлении оси транспортера).

В этом случае средняя и максимальная напряженности связаны коэффициентом пропорциональности

$$K_0 = \frac{E_{ncp}}{E_{max}}, \quad (13)$$

который характеризует неравномерность поля в ячейке и зависит от геометрии ЭСПД.

Тогда из уравнений (2), (9), (10), (13) получим при $U_v = U_{vm}$

$$I_m = 2nK_0 \varepsilon_0 S E_k, \quad (14)$$

откуда с учетом (11) следует

$$I_m = \frac{\varepsilon_0 S}{\delta} n K_0 K_p K_i U_{vm}. \quad (15)$$

В соответствии с вышеизложенным теоретическая характеристика короткого замыкания имеет вид ломаной линии \mathcal{Z} (рис. 1), точка соприкосновения отрезков которой определяется уравнением (15).

Отношение максимального тока к предельно достижимому из уравнений (3) и (14) получается равным

$$\frac{I_m}{I_{пред}} = K_0. \quad (16)$$

Отсюда ясно, что для получения возможно большего тока короткого замыкания следует в первую очередь улучшать однородность поля в зазоре. При этом, однако, нужно иметь достаточно большим и коэффициент при $U_{вт}$ в уравнении (11), чтобы достигать желаемого максимума тока при практически приемлемых значениях напряжения возбуждения.

Таким образом, необходимо установить связь коэффициентов, входящих в уравнение (15), от геометрии ротора. Это можно делать либо на основе расчета электрического поля ЭСГПД, либо с помощью моделирования этого поля. При наличии указанных зависимостей может быть разработана инженерная методика электрического расчета ЭСГПД на максимальные параметры при оптимальной геометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Купцов, В. В. Пацевич. Исследование двойного естественного переноса в ЭСГ. Изв. ТПИ, т. 191, 1969.
2. Б. Н. Каноньхин. Разряд в воздушных прослойках, заключенных в толще твердого диэлектрика. ЖТФ, т. 33, вып. 10, 1939.
3. А. В. Дмитриев. Исследование разряда в узкой полости, ограниченной с одной или с обеих сторон диэлектриком. ЖТФ, т. 33, вып. 9, 1963.
4. И. П. Гук, В. А. Лукутин. Определение потенциала поля ротора электростатической машины. Изв. ТПИ, т. 191, 1969.
5. А. М. Купцов, В. В. Пацевич. Осциллографическое исследование распределения потенциалов по ротору в ЭСГ. Изв. ТПИ, т. 191, 1969.
6. В. Д. Эськов. К вопросу о распределении потенциала по ротору ЭСГ. Изв. ТПИ, т. 152, 1966.
7. А. П. Кононов, В. В. Пацевич, В. Д. Эськов. Естественная перезарядка в ЭСГ с каскадным соединением транспортеров-проводников. Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», № 4, 1967.