

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДВОЙНОГО ЕСТЕСТВЕННОГО ПЕРЕНОСА В ЭСГ

А. М. КУПЦОВ, В. В. ПАЦЕВИЧ.

(Представлена объединенным научным семинаром кафедры ТОЭ  
и отдела РЭСГ НИИ ЯФ)

Использование части поверхности ротора, перемещающейся от высоковольтного полюса к полюсу возбуждения, для преобразования энергии в электростатическом генераторе (ЭСГ) при отсутствии перезарядки в зоне высоковольтного полюса возможно при диэлектрическом роторе при наличии зарядов обратного знака на поверхности ротора, обращенной к статору.

Введением понятия ионного экранирования в [1] показывается, что эти заряды в естественных условиях работы генератора должны накапливаться на поверхности ротора, обеспечивая равенство нулю среднего значения напряженности электрического поля в любой точке его поверхности за время одного оборота при одной паре полюсов и за  $1/p$  оборота при  $p$  пар полюсов. Единственным условием для проявления эффекта ионного экранирования считается достаточно высокое удельное электрическое сопротивление материала транспортера [1].

Явление, обусловленное наличием зарядов на «нерабочей» поверхности ротора в естественных условиях работы генератора с диэлектрическим ротором, было названо явлением двойного естественного переноса. Важное практическое следствие из этого явления заключается в том, что величина тока генератора, работающего без принудительной перезарядки с одним источником возбуждения, будет такой же, что и в генераторах с принудительной перезарядкой, если

$$U_{\text{в}} = |U_{\text{в}}'| + |U_{\text{в}}''|, \quad (1)$$

где  $U_{\text{в}}$  — напряжение возбуждения без принудительной перезарядки,

$U_{\text{в}}'$  и  $U_{\text{в}}''$  — напряжения возбуждения в зарядной и разрядной системах при схеме с принудительной перезарядкой.

Если учесть, что практическое выполнение роторного ЭСГ с принудительной перезарядкой, позволяющей в пределе вдвое увеличить ток нагрузки, встречает значительные технико-экономические трудности, в то время как использование источника возбуждения с увеличенным значением напряжения требует лишь незначительного увеличения затрат на его изготовление, то станет ясной практическая важность отмеченного выше следствия для определения и реализации их максимально возможных удельных энергетических показателей. Справедливость соотношения (1) подтверждается результатами экспериментов [1], которые, однако, не позволяют сделать сколь-либо убедительные выводы о наличии эффекта ионного экранирования [2] и не раскрывают сущ-

ности явлений, лежащих в основе этого соотношения. Ниже излагаются результаты исследований, проведенных на генераторе с каскадным соединением транспортеров-проводников, помещенных в диэлектрике, с целью выяснения вопросов, связанных с явлением двойного естественного переноса зарядов.

### Расчет тока ЭСГ при наличии двойного переноса

Рассматривая характер электрического поля на поверхности диэлектрика ротора, в котором помещены транспортеры, нетрудно установить, что при наличии эффекта ионного экранирования эта поверхность, как и нерабочая поверхность диэлектрического ротора, должна быть заряжена зарядом обратного знака по отношению к заряду транспортера. При этом величина этого заряда должна быть такой, чтобы среднее значение напряженности электрического поля на поверхности ротора за один цикл работы генератора равнялось нулю. Схематически картина электрического поля в зазоре ротор-статор будет иметь вид, представленный на рис. 1. Здесь изображена лишь половина ротора. Нижняя часть относительно осевой линии будет аналогична верхней и здесь не показана.

Обозначим для системы возбуждения в момент отсоединения транспортера от щетки заряд транспортера —  $q_1$ , заряд элемента поверхности ротора, соответствующего одному транспортеру —  $q_2$ ; заряд индуктора возбуждения —  $q_3$ , емкость транспортер — элемент поверхности —  $C_2$  и емкость между элементом поверхности и индуктором —  $C_1$ . Для высоковольтной системы: заряд транспортера, отсоединяющегося от щетки —  $q_4$ , заряд высоковольтного индуктора —  $q_5$ , емкость между элементом поверхности, приходящимся на один транспортер, и индуктором —  $C_3$ .

Не учитывая взаимного влияния транспортеров друг на друга, в результате несложных расчетов (принимая во внимание, что емкости  $C_1$  и  $C_2$  соединены последовательно, а емкости  $C_2$  и  $C_3$  — параллельно) получим:

$$-q_1 = C_0 U_B + k_1 q_2, \quad (2)$$

$$-q_4 = k_2 q_2, \quad (3)$$

где

$$C_0 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \quad k_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2}, \quad k_2 = \frac{C_2}{C_2 + C_3},$$

В уравнениях (2) и (3) величины  $U_B$  и  $q_2$  берутся с соответствующими им знаками.

Не учитывая утечку зарядов с транспортеров и с поверхности ротора, для тока нагрузки генератора из (2) и (3) получим

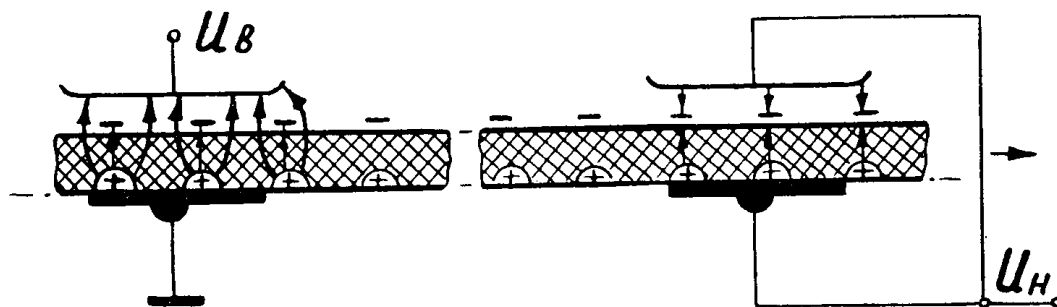


Рис. 1. Схематическое изображение поля в ЭСГП

$$I_H = A(q_1 - q_4) = -A[C_0 U_B + (k_1 - k_2)q_2]. \quad (4)$$

Здесь  $A$  — постоянная, пропорциональная количеству транспортеров и числу оборотов ротора в секунду. Из уравнения (4) следует, что при  $k_1 = k_2$ , т. е.  $C_1 = C_3$ , величина тока нагрузки генератора будет такой же, что и при  $q_2 = 0$ , и равна  $I_H = I_0 = -AC_0 U_B$ .

Если  $k_1 > k_2$ , то  $I_H = I_H' > I_0$ , а при  $U_B = 0$   $I_H' > 0$ .

Если  $k_1 < k_2$ , то  $I_H = I_H'' < I_0$ , а при  $U_B = 0$   $I_H'' < 0$ .

Далее, если положить  $C_3 = 0$ , что имеет место при отсутствии высоковольтного индуктора или при широкой щетке в высоковольтной системе, выдвинутой по ходу вращения ротора таким образом, чтобы в момент отсоединения транспортера от щетки емкость элемента поверхности, противолежащего этому транспортеру, относительно индуктора была достаточно малой величиной, то получим:

$$I_{H1} = -A[C_0 U_B + (k_1 - 1)q_2]. \quad (5)$$

Если заряд  $q_2$  обусловлен эффектом ионного экранирования, то должно соблюдаться условие

$$q_3 = -q_5. \quad (6)$$

Учитывая, что

$$\begin{aligned} q_3 &= C_0 U_B + (k_1 - 1)q_2, \\ q_5 &= (1 - k_2)q_2. \end{aligned}$$

из (6) получим

$$q_2 = \frac{C_0 U_B}{2 - k_1 - k_2}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5) и учитывая, что при  $C_2 = 0$ ,  $k_2 = 1$  получаем

$$I_{H1} = 0. \quad (8)$$

Из (4) с учетом (7) получаем

$$I_H = -2AC_0 U_B \frac{1 - k_2}{2 - k_1 - k_2}, \quad (9)$$

откуда видно, что при любых

$$k_1 < 1, k_2 < 1 \text{ и } U_B = 0, I_H = 0. \quad (10)$$

Физический смысл соотношений (8) и (10) заключается в том, что при  $C_3 = 0$  не происходит инверсии поля под высоковольтным индуктором или, иначе говоря, не происходит перераспределения части заряда  $q_1$ , связанного с зарядом  $q_2$ , между транспортером и индуктором. Вследствие этого для равенства 0 среднего значения напряженности поля на поверхности диэлектрика необходимо, чтобы  $q_1 = q_2$ . При соблюдении этого условия передача заряда в нагрузку невозможна. С другой стороны, при  $U_B = 0$  среднее значение напряженности будет равно нулю только при  $q_2 = 0$ , т. е. ток в нагрузке также должен быть равен нулю.

### Результаты экспериментов

Для проверки соотношений (1) — (10) были сняты характеристики  $I_{кз} = f(U_B)$  для однодисковой модели ЭСГ с каскадным соединением транспортеров.

Подшипники диска ротора экспериментального генератора укреплялись в специальных опорах, статор при работе генератора не использовался. Индукторы крепились на отдельных изоляционных стойках, ротор приводился во вращение двигателем постоянного тока со скоростью 1000 об/мин. Эксперименты проводились с трущимися щет-

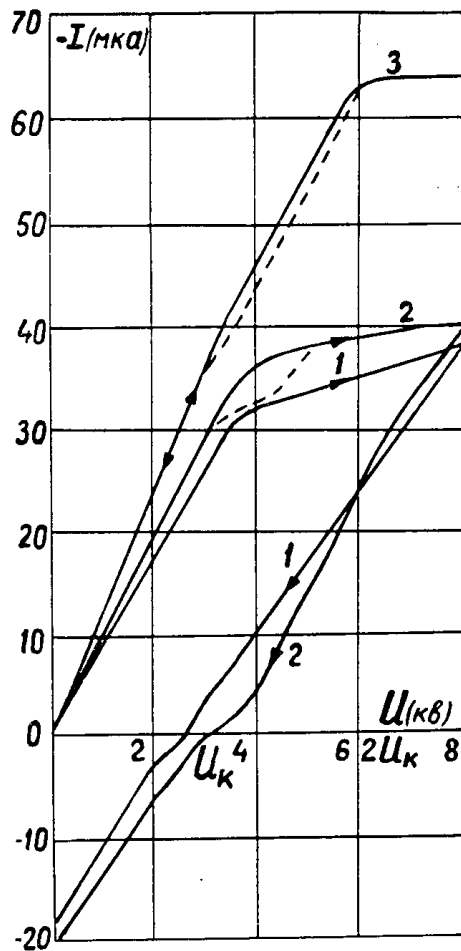


Рис. 2. Характеристики короткого замыкания при широких щетках

ками в атмосфере воздуха с относительной влажностью 39—50 проц.

На рис. 2 представлены зависимости  $-I_{кз} = f(U_B)$  при работе генератора со щетками, перекрывающими одновременно не менее пяти транспортеров. Кривая 1 снята при отсутствии высоковольтных индукторов. Кривая 2 — при работе генератора со щеткой, выступающей за край высоковольтных индукторов по ходу вращения ротора. Кривая 3 соответствует режиму работы генератора по схеме рис. 1. Эти зависимости определялись как при повышении  $U_B$ , так и при его снижении (помечено стрелками). По результатам многочисленных опытов было установлено, что для области прямолинейного участка зависимости прямой и обратный ход характеристик совпадает. Если снижение напряжения начинать при  $U_B \geq U_K$ , где  $U_K$  напряжение, соответствующее точке загиба характеристики, снятой при отсутствии высоковольтных индукторов или при щетке, выдвинутой по ходу вращения за край индукторов, то обратная кривая для характеристик 1 и 2 идет почти параллельно прямой, но несколько ниже ее. Обратный ход характеристики 3, практически совпадает с прямым ходом. Различие между прямым и обратным ходом характеристик 1 и 2 оказывалось тем больше, чем  $U_B > U_K$ .

Во всех случаях отмечалась достаточно хорошая стабильность во времени характеристик обратного хода. Например, значение тока  $I(0)$  при  $U_B = 0$  оставалось практически постоянным при работе генератора в течение часа. При повторных экспериментах характеристика начиналась со значения  $I(0) \neq 0$  и на линейном участке оставалась параллельной, полученным ранее.

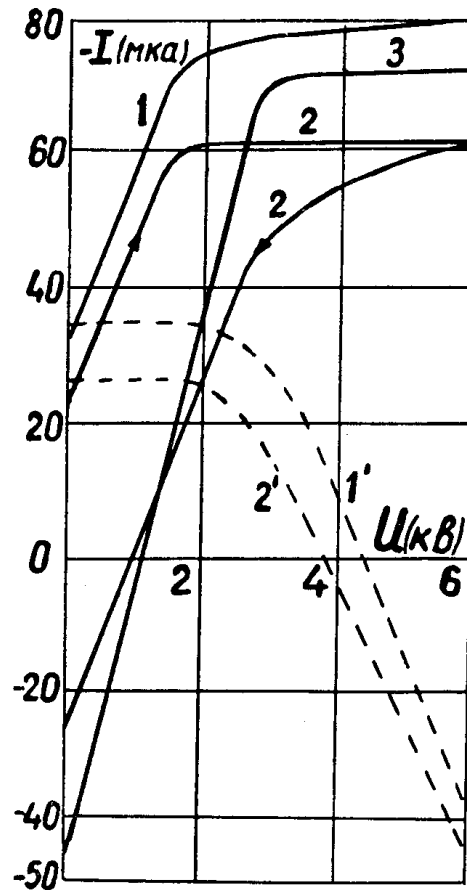


Рис. 3. Характеристики короткого замыкания при различных щетках.

Отмеченное выше явление имело место и при использовании узких щеток (касающихся одного транспортера). На рис. 3 кривые 1 и 2 получены при щетке возбуждения, перекрывающей примерно три транспортера, и щетке нагрузки, установленной без индукторов и касающейся одного транспортера. Кривая 2 получена при положительном напряжении возбуждения, кривая 1 — при отрицательном. Кривая 3 получена при одинаковых щетках, касающихся одного транспортера, при положительном напряжении возбуждения.

Здесь же представлены зависимости  $I(0)$ , полученные путем установления закоротки между щеткой и индуктором возбуждения.

На рис. 4 представлены характеристики для случаев  $C_1 > C_3$  (кривая 1) и  $C_1 < C_3$  (кривая 2) при повышении (прямой ход) и снижении (обратный ход) напряжения  $U_B$  при широких щетках. Соотношение емкостей  $C_1$  и  $C_3$  определялось по величинам зазоров между индукторами и поверхностью диэлектрика ротора.

Характер этих зависимостей остается таким же, если  $I(0) \neq 0$ , при этом изменяется лишь положение точки перегиба.

### Обсуждение экспериментальных данных

Из полученных зависимостей (рис. 2, 3, 4) непосредственно видно, что, начиная с напряжения  $U_B \approx U_K$ , на диэлектрике ротора появляется некоторый заряд.

Величина этого заряда быстро возрастает с ростом  $U_B$  при превы-

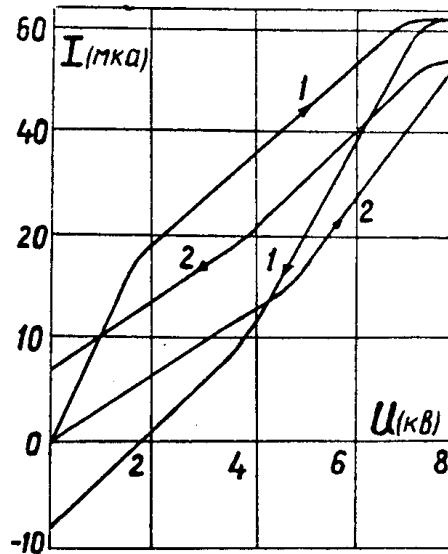


Рис. 4. Характеристики короткого замыкания при  $C_1 \neq C_3$ .

шении  $U_k$ , о чем свидетельствует увеличение тока  $I(0)$  (рис. 3, кривые 1, 2).

Однако хорошее совпадение прямого и обратного хода в начале характеристик до  $U_b \approx U_k$  и невыполнение соотношений (8, 10), согласно которым  $I_n = 0$  при отсутствии высоковольтного индуктора или при щетке, выдвинутой за край индуктора по ходу вращения, позволяет сделать вывод о том, что эффект ионного экранирования не является преобладающим в причинах, вызывающих появление этого заряда.

Сравнение характеристик 1, 2, 3 на рис. 2 позволяет следующим образом представить характер процессов, происходящих при повышении напряжения возбуждения. При повышении напряжения возбуждения до  $U_b \leq U_k$  заряд на поверхности диэлектрика будет равен нулю.

При  $U_b > U_k$  в области между поверхностью и индуктором достигаются критические градиенты и возникает корона, в результате чего поверхность диэлектрика заряжается до величины

$$q_2 = (U_b - U_k) C_2 = \Delta U C_2$$

и напряженность электрического поля понижается до величины, меньшей критической. Условиями появления короны объясняется, вероятно, нестабильность характеристик, часто наблюдающаяся при  $U_b \approx U_k$  (отмеченное на рис. 2 для прямого хода пунктиром). Заряд транспортера при этом будет равен

$$q_1 = C_0 U_k + \Delta U C_2.$$

В разрядной системе заряд транспортера, связанный с зарядом поверхности, перераспределится прямо пропорционально емкостям  $C_2$  и  $C_3$  и определится по уравнению (3).

Ток короткого замыкания генератора будет равен

$$-I = A [C_0 U_k + \Delta U C_2 (1 - k_2)]$$

или

$$-I = A [C_0 U_k + \Delta U C_0'], \quad (11)$$

где

$$C_0' = C_2 (1 - k_2) = \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}.$$

Если  $C_1 = C_3$ , т. е.  $C_0' = C_0$ , то по-прежнему имеем

$$-I = A[C_0(U_K + \Delta U)] = AC_0U_B. \quad (12)$$

При достижении критических градиентов в зоне высоковольтных индукторов там также возникает корона и часть заряда транспортера, перешедшая на индукторы, компенсируется с зарядом поверхности помимо цепи нагрузки. В цепи нагрузки устанавливается постоянное значение тока, равное

$$-I_{\text{макс}} = 2AC_0U_K. \quad (13)$$

Из описанного выше характера процессов и из уравнения (11) следует, что наклон характеристики  $I_{\text{кз}} = f(U_B)$  при различных значениях  $C_1$  и  $C_3$  должен быть различным при  $U_B < U_K$  и при  $U_B > U_K$ .

Если  $C_1 > C_3$ , то при  $0 < U_B < U_K$  характеристика должна быть более крутой, чем при  $U_B > U_K$  и, наоборот, если  $C_1 < C_3$ , то при  $0 < U_B < U_K$  характеристика должна быть более полой, чем при  $U_B > U_K$ . Кроме того, если  $q_2 \neq 0$ , то при  $U_B = 0$  и  $C_1 > C_3$  в системе возбуждения в результате перераспределения зарядов между транспортером и индуктором заряд транспортера будет меньше, чем в системе нагрузки. То есть транспортер будет разряжаться в системе возбуждения и заряжаться в системе нагрузки. В результате этого в цепи нагрузки будет протекать ток обратного знака по сравнению с током при  $U_B > 0$ . Если  $C_1 < C_3$ , то в цепи нагрузки будет протекать ток того же знака.

Таким образом, при  $C_1 \neq C_3$ , в зависимости от их соотношения принципиально различный характер должны иметь характеристики обратного хода, т. е. при уменьшении  $U_B$  (при  $q_2 \neq 0$ ). Правильность данного объяснения подтверждается рис. 4. Таким же образом можно объяснить явление смещения характеристик генератора при работе.

Если при работе генератора, у которого  $C_1 > C_3$ , снизить напряжение возбуждения при  $q_2 \neq 0$ , то его режим работы перейдет на другую, сдвинутую вправо, характеристику. Для получения того же значения тока вновь необходимо уже более высокое напряжение возбуждения. При систематическом уменьшении и увеличении тока режим работы генератора перейдет на характеристику примерно параллельную участку  $U_B > U_K$ , но значительно сдвинутую вправо, даже при незначительной разнице емкостей  $C_1$  и  $C_3$ . Если  $C_1 < C_3$ , то при снижении тока рабочий режим будет перемещаться влево и тот же ток можно получить при меньшем значении  $U_B$ . Однако это обстоятельство нельзя использовать практически при длительной работе генератора, так как за счет конечного значения проводимости величина заряда на поверхности диэлектрика будет уменьшаться. Таким образом, практически наиболее целесообразно иметь  $C_1 = C_3$  или  $C_1 \leq C_3$ .

Эти результаты хорошо согласуются с результатами исследования кривых токов в различных цепях генератора путем их осциллографирования и с результатами исследования закона распределения потенциала по транспортерам ротора. Следует отметить также, что характеристики  $I_{\text{кз}} = f(U_B)$  при принудительной перезарядке для случая  $C_1 \approx C_3$  полностью совпадают с характеристиками  $I_{\text{кз}} = f(U_B)$  без принудительной перезарядки с двумя индукторами независимо от закона изменения каждого из напряжений в отдельности, если  $U_B = |U_B'| + |U_B''|$ .

Из уравнения (12) видно, что при  $C_1 \neq C_3$  генератор с принудительной перезарядкой будет иметь те же характеристики, что и на рис. 4, если сначала повышать напряжение возбуждения до величины  $U_K$ , а затем поднимать напряжение возбуждения источника принудительной перезарядки. Эти данные дают убедительное подтверждение того, что явление двойного естественного переноса позволяет получить те же практические результаты, что и принудительная перезарядка транспортеров в высоковольтной системе.

На основе анализа процессов, происходящих при повышении напряжения возбуждения, можно предположить, что они имеют место и при работе генератора со статором из слабопроводящего материала.

В обычных условиях проводимость газа, как правило, меньше проводимости диэлектриков, следовательно, процесс осаждения ионов на поверхности диэлектрика будет компенсироваться утечками. Высокая проводимость газа будет иметь место лишь при достижении критических величин напряженности электрического поля и появлении ионизации.

По мере увеличения напряжения возбуждения критические градиенты будут возникать в местах повышенной неоднородности поля в зазоре ротор — статор. Здесь и будет происходить зарядка поверхности, в результате которой напряженность поля, обусловленного зарядом транспортера, будет понижаться до величины, меньшей критического значения.

При наличии слабопроводящего статора, например, из стекла, характер протекания процессов будет более сложным, так как индукторы отделены от поверхности ротора материалом с достаточно высоким удельным сопротивлением. Поэтому с появлением ионизации в зазоре ротор — статор неизбежным будет как появление зарядов на поверхности ротора, так и появление зарядов обратного знака на поверхности стекла. Наличие этих зарядов может в определенных условиях привести к существенному изменению распределения потенциалов по статору и в значительной степени повлиять на величину максимальных значений тока генератора.

### Выводы

1. Явление двойного естественного переноса имеет место в генераторах с каскадным соединением транспортеров-проводников, помещенных в диэлектрик (показано впервые) и в генераторах с транспортером-диэлектриком.

2. Генераторы с каскадным соединением транспортеров-проводников обладают теми же положительными свойствами (вытекающими из явлений естественной перезарядки и двойного естественного переноса), что и генераторы с транспортером-диэлектриком. Однако первые позволяют достигать более высоких отношений рабочих объемов (зазоров) к общему объему генератора при их дисковом исполнении и, следовательно, обеспечивают более высокие энергетические показатели.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Felici N. I., Cartner E., Rev. gén. electr., 62, № 2, 71; 62, № 3, 136 (1953).
2. В. И. Левитов, А. Г. Ляпин. Электростатические генераторы с жестким ротором, ч. II, ВНИИЭМ, М., 1963.