

ОБ УЛУЧШЕНИИ КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

А. М. КУПЦОВ, В. М. ФЕДЯКИН

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

Одной из основных проблем, которые необходимо решить при создании надежного промышленного электростатического генератора с проводящими транспортерами (ЭСГП), является проблема коммутации [1, 2, 3, 8]. Работы, проведенные в Томском политехническом институте по исследованию ЭСГП с большим числом транспортеров на полюсный шаг, позволили получить достаточно полное представление об основных коммутационных явлениях в них и тем самым создать предпосылки для решения этой проблемы [3,8].

В данной работе излагаются результаты экспериментального исследования некоторых способов улучшения коммутации в указанных выше электростатических генераторах.

Под улучшением коммутации понимается создание ряда условий, приближающих ее к оптимальной, т. е. обеспечивающей максимальный ток генератора при наименьшем разрушении щеток, транспортеров и диэлектрика ротора.

Уменьшение эрозии транспортеров и щеток

В [3,8] показано, что в разрядной системе генератора при коммутации происходит компенсация зарядов транспортеров и индукторов. При этом выделяется энергия, пропорциональная величине скомпенсированного заряда и разности потенциалов между коммутирующим транспортером и индуктором. Вследствие малой величины активного сопротивления соединительных проводников данной цепи практически вся энергия, запасенная емкостью транспортер — индуктор, выделяется на нелинейном сопротивлении газового разряда в промежутке транспортер — щетка, вызывая разрушение последних. Интенсивный газовый разряд, сопровождающий нанесение на транспортер избыточных зарядов, приводит к разрушению транспортеров и щетки в зарядной системе.

Вопросы разрушения электродов в сильных электрических полях для целей электроискровой обработки металлов изучены достаточно подробно. Поэтому при рассмотрении условий, уменьшающих разрушение коммутирующих элементов в ЭСГП, имеет смысл остановиться на основных факторах, обуславливающих эти разрушения.

В [4—6] показано, что величина эрозии электродов разрядного промежутка определяется, в первую очередь, величиной энергии, рас-

сеиваемой в данном разрядном промежутке. При одной и той же энергии разрушение тем больше, чем больше мощность разряда. Известно также [4,5], что эрозия электродов возрастает, если энергия разрядного промежутка выделяется в ограниченном пространстве. Напротив, рассредоточение выделяющейся энергии одного искрового канала на несколько каналов приводит к заметному снижению эрозии.

С учетом вышесказанного основными направлениями для получения приемлемой коммутации в ЭСПП могут быть:

1. Рассеяние энергии, запасенной емкостью транспортер—индуктор, вне разрядного промежутка транспортер—щетка или, по крайней мере, уменьшение части энергии, рассеиваемой на сопротивлении газового разряда.

2. Уменьшение мощности разряда.

3. Рассредоточение выделяющейся в разрядном промежутке энергии на несколько каналов.

Уменьшения доли энергии, выделяющейся в искровом канале, можно достичь введением в разрядную цепь дополнительного активного сопротивления.

Мощность разряда уменьшится при включении в разрядную цепь дополнительной сосредоточенной индуктивности, соединенной последовательно с активным сопротивлением.

Наконец, рассредоточения энергии по нескольким каналам можно достичь подбором определенной конфигурации щетки. Это может быть, например, гребенка из острий различной длины.

Ниже приводятся результаты экспериментальной проверки изложенных предположений на двух образцах ЭСПП, описанных в [3, 8].

Включение в разрядную цепь балластных сопротивлений

В соответствии с [3, 8] в разрядной системе при коммутации транспортера имеет место соотношение

$$W_3 = W_p + \Delta W,$$

где W_3 — энергия, запасенная транспортером к моменту коммутации;
 W_p — энергия, выделенная в коммутационной зоне на сопротивлении газового разряда;

ΔW — потери энергии в соединительных проводниках.

Вводя в соединительную цепь балластное сопротивление и учитывая энергию, выделенную на нем, получим

$$W_p = W_3 - W_6 - \Delta W.$$

Данное соотношение устанавливает взаимосвязь энергии, рассеянной в разрядном промежутке щетка—транспортер и обуславливающей разрушение этого промежутка, и энергии, рассеиваемой на балластном сопротивлении. Оценивая величину W_6 для различных балластных сопротивлений, легко проследить закономерности изменения W_p , а следовательно, и степень эрозии электродов.

Для подсчета W_6 , а также скорости ее изменения нами производилось осциллографирование тока в цепи щетка—транспортер. По результатам обработки осциллограмм тока в режиме короткого замыкания на рис. 1 построены кривые 1, 2 и 3.

Кривая 1 характеризует собой закон изменения энергии, выделившейся в коммутационной зоне за один акт коммутации в зависимости от величины балластного сопротивления. Кривая 2 характеризует изме-

нение амплитуды, а кривая 3 — изменение крутизны переднего фронта импульса разрядного тока.

Все кривые приведены для неизменных значений напряжений возбуждения, что обеспечивало практически неизменное значение тока, фиксируемого по микроамперметру.

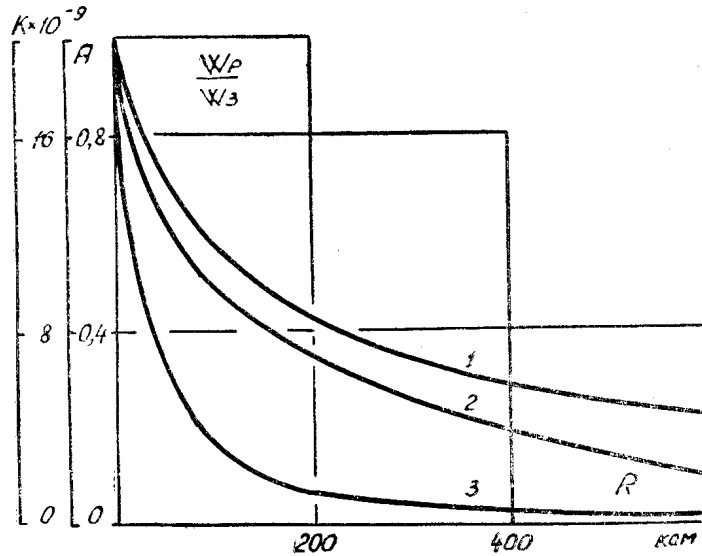


Рис. 1. А—отношение амплитуд импульсов тока при включенном балластном сопротивлении и без него

На рис. 2 приведены характеристики тока короткого замыкания, полученные при различных балластных сопротивлениях для трущихся щеток (кривая 1) и щеток, выполненных в виде острий (кривые 2—5).

Поскольку при трущихся щетках включение балластных сопротивлений от 0 до 5 мом изменений в характеристике не вызывало, то на рис. 2 представлена только одна кривая.

Как следует из приведенной на рис. 1 кривой, наиболее резкое уменьшение энергии, выделенной в разрядном промежутке, достигается при включении сопротивлений до 300 ком. В этом же интервале наиболее резко изменяются амплитуда и крутизна фронта импульсов тока. Поскольку мощность разряда прямо пропорциональна амплитуде и крутизне импульсов тока [7], то на основании хода кривых 2 и 3 заключаем, что включение балластных сопротивлений эффективно ограничивает и мощность разряда.

Кривые рис. 2 устанавливают взаимосвязь тока генератора при различных напряжениях возбуждения с величиной балластных сопротивлений. Из рисунка следует, что при трущихся щетках включение балла-

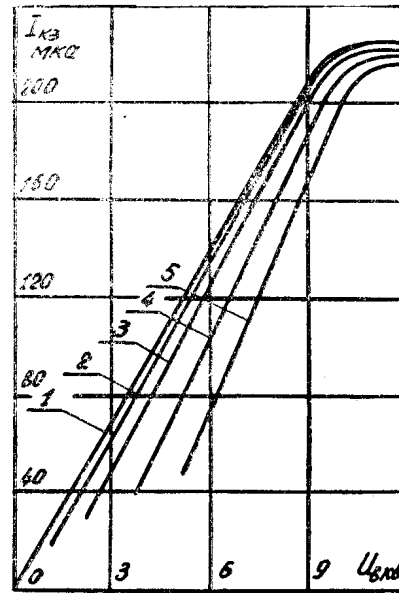


Рис. 2. 1—щетки, трущиеся при R_6 от 0 до 5 мом, 2—5—щетки острия ($R_6 = 50, 510, 1000, 2700$ ком)

стных сопротивлений в широких пределах снижения тока генератора не вызывает. Это значит, что в этом случае уменьшение энергии и мощности разряда достигается без ухудшения параметров генератора. Это вполне согласуется с представлениями о коммутационных процессах, как процессах компенсации зарядов [3, 8].

Действительно, полагая процесс коммутации зарядов аналогичным процессу разряда конденсатора, замкнутого на R_6 , находим,

$$\text{что} \quad R_6 \lesssim \frac{t_k}{5C},$$

т. е. R_6 ограничено только временем коммутации t_k . Поскольку при трущихся щетках t_k может изменяться в широких пределах вплоть до T_k — времени повторения коммутаций [3], то R_6 может быть увеличено без снижения тока генератора до величины

$$R_6 \lesssim \frac{T_k}{5C}.$$

Иное дело при щетках, выполненных в виде острий, обеспечивающих только газоразрядную коммутацию. Время коммутации здесь ограничено временем существования газового разряда, которое зависит и от балластного сопротивления. Несмотря на то, что с ростом R_6 оно увеличивается, ток генератора при одном и том же U_b становится несколько меньшим.

Это можно объяснить следующим образом. Включение сопротивления приводит, как известно [9], к уменьшению скорости поступления энергии в разрядный промежуток и, как следствие, к увеличению напряжения погасания газового разряда [10].

Последнее обуславливает величину нескомпенсированного за время коммутации заряда. С ростом R_6 эта величина возрастает, что объясняет изменение тока генератора. Например, при сопротивлениях более 20–40 *мом* ток генератора уменьшается практически до 0.

Существенно отметить, что при увеличении напряжения возбуждения снижение тока генератора за счет балластных сопротивлений становится менее значительным. Так, в области насыщения тока эта разница лежит в пределах погрешности измерений, составляя величину в 5–10%.

Это вполне согласуется с представлениями о развитии газового разряда при различных перенапряжениях [9].

Исследование работы генератора в режиме нагрузки показало, что включение балластных сопротивлений до 500 *ком* практически не изменяет нагрузочных характеристик.

Из сопоставления результатов анализа характеристик генератора и измерения энергии в разрядных промежутках видно, что оптимальная величина сопротивления R_6 — порядка 150–300 *ком*. Дальнейшее его увеличение не эффективно, так как снижение энергии в коммутационных промежутках незначительное. Подтверждение эффективности снижения эрозии коммутирующих элементов за счет балластных сопротивлений было получено после осмотра коммутирующих элементов генератора, проработавшего 200 часов в атмосфере азота под давлением в 10 *атм*. Генератор с диаметром ротора 140 *мм*, с двумя парами полюсов работал в режиме короткого замыкания с щетками из стальных швейных игл. Зазоры между иглами и ротором устанавливались с помощью специального калибра. Возбуждение обеих пар полюсов осуществлялось от одного источника возбуждения, а высоковольтные цепи (в одну из которых включалось $R_6 = 100$ *ком*) были разделены с целью регистрации токов. Осмотр показал, что щетка в цепи с балластным сопротивлением

обгорела значительно меньше. Зазоры относительно первоначально установленных изменились в цепи с балластным сопротивлением в 0,3, а в цепи без сопротивления — в 2 раза.

Таким образом, регулирование энергии и мощности коммутационных разрядов включением балластных сопротивлений представляется весьма перспективным для выполнения приемлемой коммутации в ЭСГ с проводящими транспортерами.

Включение индуктивности и балластного сопротивления

При включении индуктивности и сопротивления в цепь коммутирующего транспортера мы предполагали, что это приведет к существенному уменьшению амплитуды и крутизны фронта импульсов разрядного тока. При этом ожидалось резкое уменьшение мощности разрядов. Экспериментальной проверкой данного предположения установить не удалось.

В цепь транспортера мы включали индуктивности порядка $50 \div 300$ мГн с различными балластными сопротивлениями. Полученные осциллограммы показывают, что за счет включенной индуктивности форма импульсов тока изменяется несущественно. Отмечается лишь незначительное уменьшение крутизны фронта импульса при небольшом увеличении его длительности.

Уменьшение мощности коммутационного разряда при включении индуктивности сопровождается весьма слабым уменьшением яркости свечения разряда.

Следует отметить, что дальнейшее увеличение индуктивности (от 300 мГн до 1 Гн) при неизменной величине балластного сопротивления не приводит к каким-либо существенным переменам, несмотря на то, что прикидочные расчеты при данной величине индуктивности указывают на возможность зарядки (или разрядки) транспортера на «полуволне», т. е. при форме тока, близкой к синусоидальной. Очевидно, это объясняется большими межвитковыми емкостями выполненной индуктивности. Не исключается и пробой индуктивности, поскольку в момент коммутации к индуктивности прикладывается напряжение $U=L \frac{di}{dt}$, соизмеримое с напряжением возбуждения.

Учитывая вышесказанное, можно заключить, что регулировать мощность коммутационных разрядов включением индуктивностей нецелесообразно. Более эффективным оказывается включение балластных сопротивлений, снижающих одновременно как энергию, так и мощность коммутационных разрядов.

Рассредоточение энергии коммутационных разрядов щетками, выполненными в виде гребенки

Выше отмечалось, что при рассредоточении энергии, выделяющейся в одном канале разряда, по нескольким величина эрозии электродов уменьшается. Чтобы проверить это при работе генератора, вместо щеток-острий устанавливались щетки, выполненные в виде гребенки. Острия гребенки располагались на различных расстояниях от торцевой поверхности ротора, при этом у острия, которое первым коммутирует с транспортером, удаление от поверхности ротора наибольшее. У последнего — наименьшее.

Длина гребенки изменялась до величины двух расстояний между транспортерами. Количество острий в гребенке устанавливалось от 5 до 15. Подбором расстояний острий достигалась многократная коммутация транспортера с каждым из острий гребенки. За каждый акт коммутации при этом компенсировалась только часть заряда транспортера и индуктора. Форма газового разряда определялась напряжением возбуждения, режимом работы и удалением острий гребенки от торцевой поверхности ротора.

На рис. 3 показана осциллограмма импульсов тока при коммутации транспортера с помощью гребенки. Из осциллограммы видно, что коммутация осуществляется неоднократно. Каждый акт коммутации в цепи щетки вызывает импульсы тока, амплитуда которых много меньше, чем

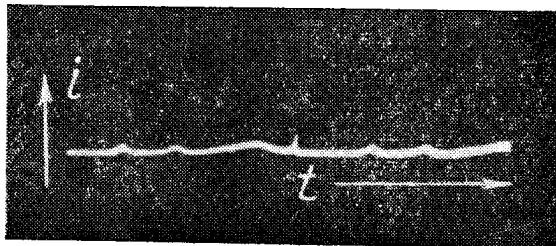


Рис. 3

амплитуда импульсов при однократной коммутации [3, 8]. Импульсы нерегулярные и различной формы, что объясняется характером газового разряда с каждого из острий гребенки. Действительно, визуальные наблюдения за коммутационной зоной показывают, что с острий развиваются как слабые искровые разряды, так и коронные. Изменением режима работы генератора и

положением гребенки можно достичь слабого, распределенного равномерно по всем остриям гребенки, коронного разряда.

Анализ осциллограмм тока показывает, что мощность каждого отдельного разряда несоизмеримо мала по сравнению с мощностью одиночного разряда при коммутации трущимися щетками или в виде одиночных острий. Это, следовательно, обуславливает меньшую эрозию коммутирующих элементов, несмотря на то, что общее количество энергии, выделенной в коммутационных зонах, от рассредоточения коммутации не изменилось.

Стochasticая работа генератора в атмосфере азота (10 атм) показала, что обгорание игл гребенки незначительное. Изменения зазоров между ротором и каждой из игл гребенки с помощью калибра установить не удалось.

Уменьшение разрушения диэлектрика ротора

Наряду с разрушением транспортеров и щеток разряды, сопровождающие коммутацию, разрушают и диэлектрик ротора. Разрушение диэлектрика всегда происходит только с набегающей на щетку стороны транспортера. Это объясняется тем, что искровой разряд между щетками и движущимся к ней транспортером частично проходит по поверхности диэлектрика, прилегающего к торцу транспортера. Вследствие высокой температуры искрового канала диэлектрик частично испаряется и загрязняет рабочий объем генератора, что, в конечном счете, приводит к снижению его энергетических характеристик. Пример такого разрушения приведен на рис. 4, где показана часть ротора с одним транспортером. Область разрушения диэлектрика, приведенная на данном рисунке, имеет конусообразную форму темного цвета. Основание конуса прилегает к торцу транспортера. Поскольку разрушения обусловлены искровыми разрядами, то основной мерой снижения разрушения диэлектрика ротора должно быть уменьшение энергии и мощности, вы-

деляющихся в искровом канале. Для этого можно воспользоваться способами, указанными выше. Однако разрушение диэлектрика можно исключить и путем выбора определенной конфигурации торцевой поверхности ротора. Например, при выполнении транспортеров, выступающих над поверхностью диэлектрика.

В этом случае путь разряда между щеткой и транспортером проходит на достаточном расстоянии от диэлектрика и, следовательно, диэлектрик не разрушается. Однако такое выполнение ротора не целесооб-

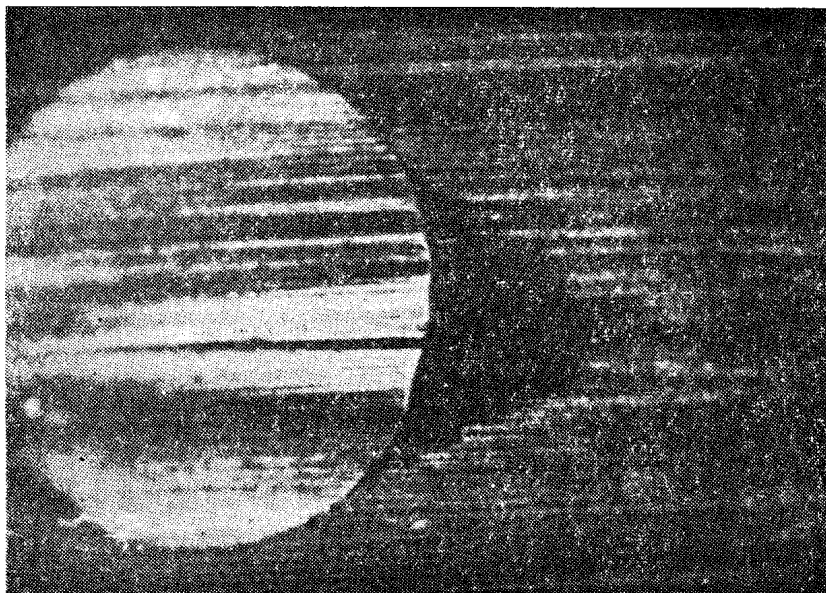


Рис. 4

разно с точки зрения электрической прочности промежутка между соседними транспортерами. Чтобы не нарушить электрической прочности указанного промежутка и исключить выплавление диэлектрика, на одном из роторов экспериментального генератора мы выфрезеровали часть диэлектрика, прилегающую к коммутирующим концам транспортеров в виде лунок.

При диаметре транспортеров в 3,5 мм и расстояниях между их центрами в 9 мм диэлектрик был убран у поверхности одной трети транспортеров на глубину в 2 мм, у другой на глубину 4 мм и у части транспортеров диэлектрик совсем не убирался. Дополнительной проверкой установлено, что электрическая прочность промежутка между соседними транспортерами от этого не ухудшилась.

После ста часов работы генератора в атмосфере азота под давлением оказалось, что поверхность той части ротора, вокруг транспортеров которой был выбран диэлектрик, осталась без изменения как при 2-х так и 4-х мм глубины выемки. В контрольной части ротора диэлектрик был выплавлен аналогично рис. 4.

Таким образом, экспериментальные данные указывают на возможность исключения разрушения диэлектрика за счет выполнения определенной конфигурации торцевой поверхности ротора.

Выводы

Проведенные исследования по улучшению коммутации в ЭСГП показали следующее:

1. Включение в разрядную цепь генератора балластных сопротивлений эффективно снижает энергию и мощность коммутационных разрядов и, как следствие, ведет к снижению эрозии электродов.

2. Включение в разрядную цепь генератора индуктивности нецелесообразно.

3. Осуществление коммутации с помощью гребенки приводит к расщеплению коммутационных разрядов по всей длине щетки при резком уменьшении мощности каждого из разрядов.

4. Чтобы диэлектрическая поверхность ротора под действием коммутационных разрядов не разрушалась, следует сделать лункообразные углубления вокруг транспортеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. N. I. Felici. «Journal de Physique et Radium», S. 8, v. 10, 1949.
 2. В. И. Левитов, А. Г. Ляпин. Электростатические генераторы с жестким ротором, ч. I. Цинтиприборэлектропром, М., 1963.
 - 3) А. М. Купцов. Физические процессы в ЭСГ с транспортерами-проводниками, помещенными в твердый диэлектрик. Диссертация, Томск, 1968.
 4. Б. А. Золотых. Физические основы электронской обработки металлов. ГИТТЛ, М., 1953.
 5. Н. Ф. Побежимов, А. Т. Чепиков. Пробой твердых диэлектриков и полупроводников. «Энергия», М., 1964.
 6. «Электронская обработка металлов». Тр. ЦНИИЛ-ЭЛЕКТРОМ АН СССР, вып. 1, 1957.
 7. Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин и др. Основы теории цепей. ГЭИ, М.—Л., 1963.
 8. А. М. Купцов, В. В. Пацевич. Электричество, № 7, 1968.
 9. А. И. Гаврилин и др. Пробой твердых диэлектриков. «Энергия», М., 1964.
 10. И. С. Маршак. Импульсные источники света. ГЭИ. М.—Л., 1961.
-