

сом $x(t)$, что позволяет существенно уменьшить погрешность интегрирования. Схема сброса через время t_u устанавливает регистр в начальное состояние, которое соответствует нулевому напряжению на выходе ЦАП. Для устранения перекрытия импульсов, поступающих на интегратор I_1 , они вырабатываются дискриминатором лишь при пересечении процессом $x(t)$ уровня дискриминации снизу. В интеграторах параллельно конденсатору C включено сопротивление R_y . При таком включении интегратор работает аналогично фильтру низких частот, что существенно облегчает методику измерения, так как отсутствует дрейф нуля интегратора.

На основании этой функциональной схемы изготовлен макет регрессометра и экспериментально проверен предложенный метод. Максимальная ошибка определения ординат линии регрессии при измерениях не превышала 5%, причем, увеличивая постоянную времени интегрирования интеграторов, погрешность можно еще более уменьшить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирьянов Г. К.— Изв. вузов СССР. Радиофизика, 1967, т. 10, № 11.
2. Тюрин П. Г. Об экспериментальном нахождении линии регрессии стационарных процессов.— Труды I Всесоюзного симпозиума: Методы представления и аппаратурный анализ случайных процессов.— М., 1968.
3. Демкин Л. П., Тюрин П. Г.— В сб.: Морское приборостроение. Сер. акустика, 1973, вып. 3.
4. Мирский Г. Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов.— М., 1972.
5. Чеголин П. М., Пойда В. Н. Методы, алгоритмы и программы статистического анализа.— Минск, 1971.

Поступила в редакцию
12.05.80

Кафедра радиофизики
и электроники СВЧ

УДК 621.793.184

И. Г. НЕКРАШЕВИЧ, В. А. ЛАПШИН

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ, ЭРОЗИОННЫМИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

Основными характеристиками вакуумного дугового разряда являются электрическая мощность, выделяющаяся в дуговом промежутке, тепловая мощность, рассеиваемая на электродах и скорость разрушения электродов. Изучение этих характеристик актуально в связи с интенсивными исследованиями в нашей стране [1—3] и за рубежом [4—6] новых типов электродуговых устройств таких, как сильноточные коммутационные системы, электродуговые нагреватели газа и ускорители плазмы.

Следует отметить, что особенный интерес представляет выяснение взаимосвязи между электрическими характеристиками дугового разряда, скоростью эрозии электродов и их физическими свойствами, а также тепловыми потоками, рассеиваемыми в электродах. Решение этой задачи позволит уточнить представление об основных физических процессах, протекающих в дуге, правильно выбрать режим работы и материалы электродов при создании новых приборов и технологических процессов, в основе работы которых используется дуговой разряд.

Целью работы явилось изучение взаимосвязи катодного падения потенциала в вакуумной дуге со скоростью эрозии электродов и тепловыми потоками, поступающими в них. Для этого проводились измерения тока дуги и катодного падения потенциала, времени горения дуги, массы, температуры и скорости эрозии электродов.

Измерение катодного падения потенциала проводилось методом измерения напряжения на электродах вакуумной дуги при давлении остаточных газов в экспериментальной камере порядка 10^{-4} Па. При заданном токе дуги электрическая мощность, выделяющаяся в дуговом про-

межутке, определяется величиной катодного падения потенциала. Экспериментальная установка и методика измерений описаны в [7]. Погрешность измерения катодного падения потенциала при использовании запоминающего вольтметра не превышала 2%. Электроды изготавливались в виде литых цилиндров диаметром 40—50 мм с плоскими торцами из металлов с существенно различающимися физическими свойствами (цинк, алюминий, медь, никель).

В основу метода измерения скорости эрозии электродов положен весовой метод, т. е. метод определения убыли веса электрода за единицу времени горения дуги. Погрешность измерения скорости эрозии не хуже 15%.

Температура электродов дуги в вакууме измерялась с помощью хромель-алюмелевых термопар. Для получения более достоверных результатов измерений температуры в каждый электрод впрессовывались по 4 термопары в разных местах. Для снижения теплоотвода электроды крепились на тонких длинных стальных спицах. Зная теплоемкость металла электрода и его массу, можно по приращению его температуры за единицу времени определить тепловой поток, поступающий в электрод. Измерения катодного падения потенциала, тока дуги и температуры электродов проводились при строго одинаковых условиях горения дуги.

Исследования зависимости катодного падения потенциала от величины тока дуги показали, что в исследованном диапазоне от 5 до 700 А катодное падение увеличивается с ростом тока. Характер этой зависимости для исследованных металлов одинаков. При увеличении тока дуги до 100 А зависимость катодного падения потенциала U_c от тока дуги I и теплоты испарения металла катода q можно выразить в виде:

$$U_c = U_1 + A \cdot q \cdot I^b \quad (1)$$

При дальнейшем увеличении тока дуги зависимость приобретает вид

$$U_c = U_2 + B \cdot q \cdot 10^{c \cdot I} \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) U_1 , U_2 , A , B , b , c — постоянные для каждого металла.

Характер зависимости скорости эрозии материала катода от тока дуги также определяется диапазоном изменения тока.

С повышением тока до 100 А зависимость скорости эрозии γ от тока имеет вид

$$\gamma = H \cdot I^b \quad (3)$$

При дальнейшем увеличении тока

$$\gamma = D \cdot 10^{c \cdot I} \quad (4)$$

Коэффициенты H , D , b , c — постоянные для данного металла. Совпадение участков изменения характера зависимости катодного падения потенциала и скорости эрозии от тока дуги в области 100 А, по нашему мнению, не случайно. Исследования, проведенные в работе [8], показали, что именно в этом диапазоне изменения тока дуги меняются структура и тип катодных пятен, а также характер их движения и взаимодействия.

Следовательно, изменения характера зависимости катодного падения потенциала и скорости эрозии от тока дуги связано с перестройкой структуры и типа катодных пятен дуги, определяющих характер протекания основных процессов электрической дуги.

Проведенные исследования показали, что катодное падение потенциала и скорость эрозии, отнесенная к току дуги, т. е. коэффициент электропереноса с одинаковым видом кривых возрастают с увеличением тока, а зависимость катодного падения потенциала U_c от коэффициента электропереноса σ можно представить в виде:

$$U_c = U_3 + \sigma \cdot q \cdot \epsilon, \quad (5)$$

где U_3 и ϵ — постоянные для данного металла.

Из (5) можно получить выражение, связывающее электрическую мощность W , выделяющуюся в дуговом промежутке со скоростью эрозии катода γ :

$$W = U_c \cdot I = U_3 I + \sigma \cdot I \cdot q \cdot \epsilon = W' + \gamma \cdot q \cdot \epsilon. \quad (6)$$

Тепловые потоки, поступающие в электроды вакуумного дугового разряда, определялись при регулировке тока дуги в диапазоне от 10 до 100 А. В результате проведенных исследований установлено, что тепловой поток, отводимый от катодных пятен в глубь катода вследствие теплопроводности, является наибольшей частью среди тепловых потоков, рассеиваемых на катоде стационарной вакуумной дуги. Для разных металлов тепловая энергия, отводимая теплопроводностью, в 6—8 раз превышает энергию, отводимую от катода испарением атомов, и в 2—3 раза превышает энергию, отводимую от катода эмиссией электронов.

С увеличением тока дуги соотношение между потоками меняется. Удельный вклад теплового потока, потребляемого испарением атомов катода, возрастает, а удельный (т. е. отнесенный к току дуги) вклад теплового потока, отводимого в глубь катода, уменьшается, и металл в области катодных пятен при увеличении тока дуги перегревается. Этим эффектом можно объяснить изменение структуры и типа катодных пятен при увеличении тока дуги, так как температура металла в области катодного пятна определяет характер протекания физических процессов в дуге и, следовательно, тип катодных пятен.

В исследованных режимах горения дуги тепловые потоки, поступающие на анод, в 1,5—2 раза превышают потоки, рассеиваемые на катоде вследствие теплопроводности. Установлена корреляция между катодным падением потенциала и суммарным тепловым потоком, поступающим на анод, и тепловым потоком, рассеиваемым на катоде. Для металлов с большим катодным падением выше тепловые потоки, поглощаемые как анодом, так и катодом. Из исследованной группы металлов наименьшие тепловые потоки определены в случае цинковых электродов, наибольшие — в случае алюминиевых. Качественное объяснение наблюдаемых зависимостей можно представить в следующем виде.

Увеличение коэффициента электропереноса σ обусловлено возрастанием температуры поверхности металла в катодном пятне при увеличении тока дуги I . Это связано с тем, что количество поступающего в катод тепла, при возрастании тока дуги пропорционально квадрату радиуса катодного пятна, а количество тепла, отводимого теплопроводностью, пропорционально его радиусу [2]. При достаточном увеличении тока дуги катод не в состоянии рассеивать теплопроводностью вводимую в него тепловую мощность, что и вызывает повышение его температуры.

Скорость эрозии определяет собой затраты энергии на испарение металла катода, потребляемой дуговым разрядом. Катодное падение потенциала при заданном токе дуги является количественной электрической характеристикой этой энергии, поэтому дополнительное увеличение скорости эрозии требует и дополнительного увеличения энергии, что реализуется возрастанием катодного падения.

Характер зависимости катодного падения от коэффициентов, определяющих процесс испарения, дает основание считать, что возрастание катодного падения при увеличении тока дуги происходит вследствие возрастания энергетических затрат на теплофизические процессы в катодном пятне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги.— М., 1968.
2. Раховский В. И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме.— М., 1970.
3. Игнатко В. П., Кухтиков В. А.— В сб.: Сильноточные электрические контакты и электроды. Киев, 1972, с. 28.
4. Фаррэлл Д.— ТИИЭР, 1973, т. 61, № 8, с. 68.
5. Daalder J. E.— J. Phys., 1975, v. 8D, p. 1647.
6. Хольм Р. Электрические контакты.— М., 1961.
7. Некрашевич И. Г. и др.— «Весці АН БССР. Сер. фіз.-мат. навук», 1979, № 6, с. 142.
8. Зыкова Н. М. и др.— ЖТФ, 1970, т. 40, № 11, с. 2361.

Поступила в редакцию
03.01.81.

Кафедра радиотехники
и физической электроники, НИИ ПФП