

УДК 537.5; 544.6

СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ ФЛУКТУАЦИЙ ТОКА ДУГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В СИСТЕМЕ ТВЕРДЫЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОД — РАСПЛАВ КАРБОНАТОВ

А. В. Решетников, В. И. Санников*, В. Н. Скоков, В. П. Коверда

Институт теплофизики УрО РАН, 620016 Екатеринбург

* ООО НПФ “Битек”, 620137 Екатеринбург

E-mail: reshav@itp.uran.ru

Измерены флуктуации тока дугового разряда, возникающего между твердым металлическим электродом и жидким расплавом щелочных карбонатов при атмосферном давлении. По экспериментальным данным определены спектры мощности флуктуаций тока дугового разряда. Показано, что мощность флуктуаций обратно пропорциональна частоте ($1/f$ -флуктуации). Флуктуации имеют нормальное гауссово распределение. Отмечена масштабная инвариантность наблюдаемых $1/f$ -флуктуаций.

Ключевые слова: дуговой электрический разряд, спектр мощности, $1/f$ -шум, жидкий электрод, неравновесные фазовые переходы.

При возникновении электрического разряда наблюдаются значительные флуктуации тока и напряжения. Обнаруженное возрастание пульсаций мощности при низких частотах свидетельствует о возможности крупномасштабных “выбросов” в системе. Электрические флуктуации, спектр мощности которых изменяется обратно пропорционально частоте (так называемый фликкер-шум или $1/f$ -шум), обнаружены в электронных устройствах более 80 лет назад [1]. Оказалось, что случайные процессы с $1/f$ -спектром встречаются во многих случаях. Однако общепринятая модель этого явления отсутствует. Рассмотрены различные причины появления $1/f$ -спектра и строятся различные модели. Особенно 1/ f -флуктуаций является их масштабная инвариантность. Предпринимались попытки объяснить механизм генерации масштабно-инвариантных флуктуаций на основе концепции самоорганизованной критичности [2], которая используется для описания сложных систем с развитыми флуктуациями.

Исследование случайных процессов в теплофизических системах показало, что флуктуации с $1/f$ -спектром могут возникать в результате взаимодействия различных неравновесных фазовых переходов в условиях белого шума [3]. В этом случае флуктуации характеризуются самоподобным распределением плотности вероятности, не изменяющимся во времени. Характерным примером неравновесных фазовых переходов (смены стационарных режимов процессов) являются процессы, обусловленные электрическим разрядом. При этом возможно взаимодействие различных фазовых переходов в плазме разряда и приэлектродных областях. В работе [4] приведены результаты экспериментального исследования флуктуационных явлений при дуговом электрическом разряде в воде. Показано, что спектр мощности флуктуаций тока дугового разряда может иметь вид $1/f$. Спектры мощности с низкочастотной расходимостью исследованы в работе [5] применительно к вакуумной дуге и динамике катодных пятен. В [6] изучены $1/f$ -спектры в электрохимических процессах.

В данной работе приводятся результаты экспериментов по определению спектров мощности флуктуаций тока электрической дуги в системе металлический электрод (нержавеющая сталь 06Х19Н9Т) — расплав тройной карбонатной эвтектики (40 % Li_2CO_3 — 30 % Na_2CO_3 — 30 % K_2CO_3). Выбор системы обусловлен перспективностью использования жидких электролитов в плазменных технологиях, в частности, в технологии анодной обработки, а также в режиме локальных электрических разрядов для защиты от коррозии [7].

Изготовлена экспериментальная установка, позволяющая контролировать температуру, давление и расстояние между металлическим электродом и расплавленным электролитом [8]. Эксперименты проводились при атмосферном давлении. Расплав щелочных карбонатов получался резистивным нагревом до температуры 550°C в алундовом тигле объемом 10 мл. Один из электродов, выполненный в виде пластины, был полностью погружен в расплав. Стержень, на котором он крепился, изолировался трубкой из алунда. Второй электрод (подвижный) диаметром 1,6 мм помещался над расплавом и по замыканию цепи фиксировал уровень расплава. Между подвижным электродом и расплавом подавалось постоянное напряжение 350 В. Затем этот электрод медленно поднимался из расплава. Между твердым электродом и поверхностью расплава зажигалась дуга. Рабочее расстояние между электродами составляло $10 \div 15$ мм. Средняя сила тока разряда составляла

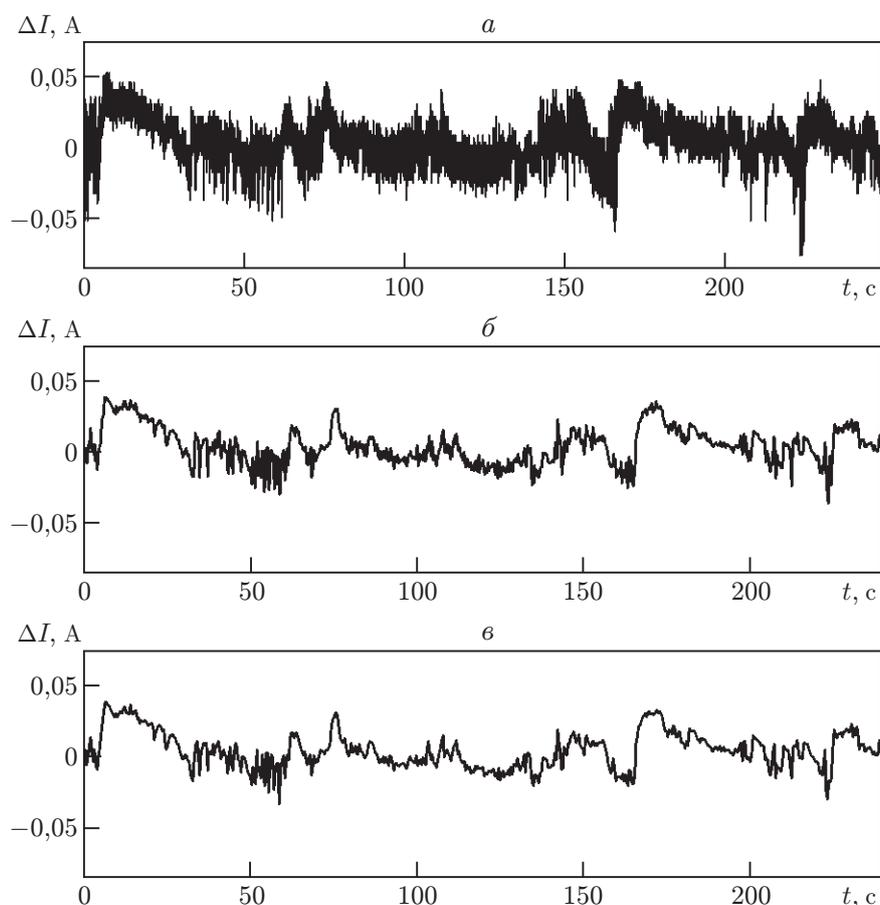


Рис. 1. Реализации флуктуаций тока электрической дуги:

a — исходная экспериментальная реализация; *б* — “сглаженная” реализация при коэффициенте масштабного преобразования, равном 32; *в* — “сглаженная” реализация при коэффициенте масштабного преобразования, равном 64

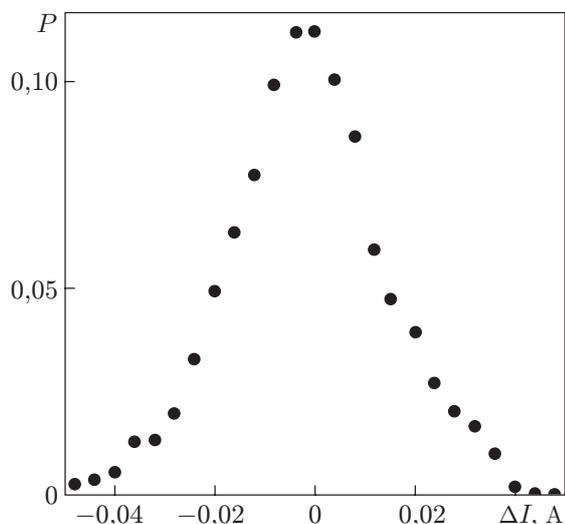


Рис. 2

Рис. 2. Функция распределения флуктуаций тока

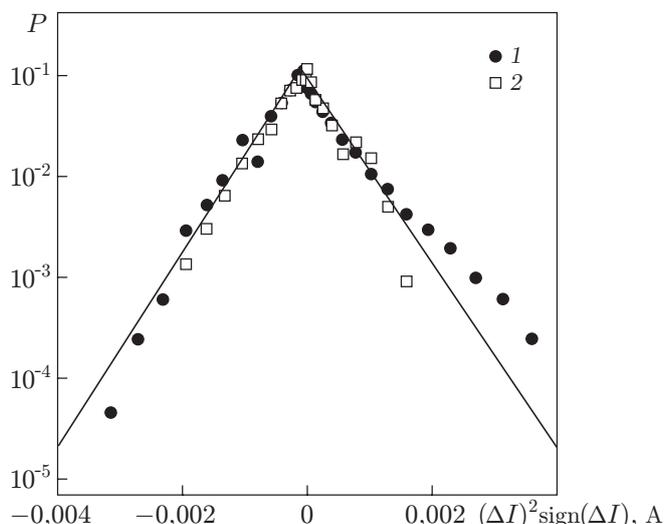


Рис. 3

Рис. 3. Функция распределения флуктуаций:

1 — исходная экспериментальная реализация; 2 — “сглаженная” реализация; прямые линии — гауссово распределение

0,8 ÷ 0,9 А. Сначала дуговой разряд был существенно нестационарным. Через некоторое время дуга выходила на стационарный режим. При этом температура расплава составляла около 640 °С, среднее межэлектродное падение напряжения при дуговом разряде — около 50 В. В ходе экспериментов полярность электродов менялась.

После зажигания дуги и выхода процесса на стационарный режим проводилась запись флуктуаций тока дугового разряда. Данные, представленные на рис. 1,а, соответствуют случаю, когда твердый электрод является катодом, а жидкий расплав — анодом. Длина реализации составляет 65 536 точек. На рис. 1,б,в приведены реализации, полученные из исходной (рис. 1,а) путем осреднения по некоторому масштабу времени. Так, реализация на рис. 1,б получена из исходной осреднением по окнам, содержащим 32 точки, а реализация на рис. 1,в — осреднением по окнам, содержащим 64 точки. Видно, что реализации на рис. 1,б,в слабо различаются. Это означает, что при последовательном осреднении реализаций по различным масштабам проявляются масштабно-инвариантные свойства флуктуаций.

Масштабная инвариантность означает, что при осреднении реализаций функция распределения флуктуаций не изменяется. Функция распределения флуктуаций тока приведена на рис. 2. Видно, что распределение флуктуаций близко к нормальному гауссову. На рис. 3 функция распределения приведена в полулогарифмических координатах в зависимости от квадрата аргумента. В таком представлении нормальному гауссову распределению соответствуют прямые линии. Точки 1 на рис. 3 соответствуют исходной реализации (см. рис. 1,а), точки 2 — “сглаженной” реализации (см. рис. 1,б).

В модели взаимодействующих неравновесных фазовых переходов функция распределения $1/f$ -флуктуаций для одного источника также близка к гауссовой, но имеет длинные “хвосты” амплитудных “выбросов”. При масштабных преобразованиях плотность вероятности стохастического процесса с $1/f$ -спектром принимает бимодальный вид и становится масштабно-инвариантной [9]. При суперпозиции независимых источников флуктуаций функция распределения принимает гауссов вид, что согласуется с центральной предельной

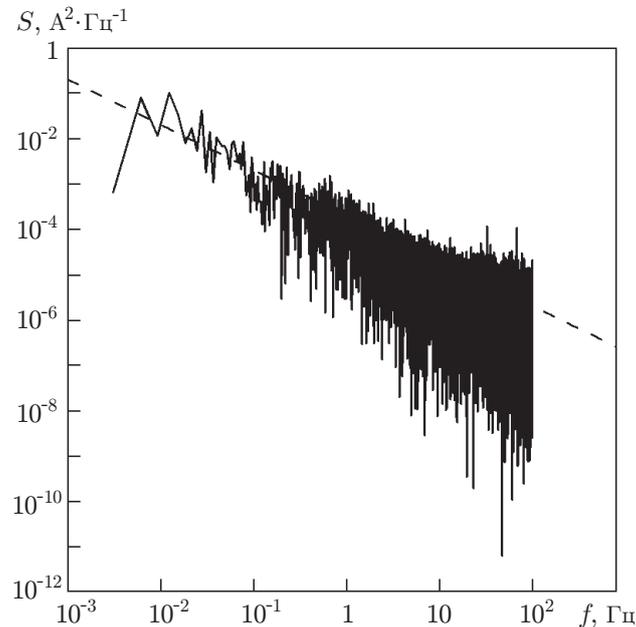


Рис. 4. Спектр мощности флуктуаций тока

теоремой. При этом сохраняются масштабно-инвариантные свойства флуктуаций. В экспериментах, как правило, исследуется ансамбль независимых источников флуктуаций, поэтому экспериментально наблюдаемые реализации часто имеют гауссово распределение (см. рис. 2, 3).

По измеренным реализациям методом фурье-преобразования определены спектры мощности флуктуаций. Данные на рис. 4 соответствуют реализации, показанной на рис. 1,а. Штриховая линия на рис. 4 соответствует обратно пропорциональной частотной зависимости спектра мощности ($S \sim 1/f$). Видно, что экспериментальный спектр мощности имеет вид $1/f$ при изменении частоты более чем на три порядка. При изменении полярности электродов принципиального различия в поведении спектров мощности не обнаружено.

Таким образом, при дуговом электрическом разряде в системе с жидким электродом наблюдаются низкочастотные крупномасштабные флуктуации тока дуги со спектром мощности, обратно пропорциональным частоте. Флуктуации имеют нормальное распределение и обладают масштабно-инвариантными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коган Ш. М. Низкочастотный токовый шум со спектром типа $1/f$ в твердых телах // Успехи физ. наук. 1985. Т. 145, № 2. С. 285–328.
2. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality // Phys. Rev. A. 1988. V. 38, N 1. P. 364–374.
3. Коверда В. П., Скоков В. Н., Скрипов В. П. $1/f$ -шум при неравновесном фазовом переходе. Эксперимент и математическая модель // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1998. Т. 113, вып. 5. С. 1748–1757.
4. Скоков В. Н., Коверда В. П., Решетников А. В. Самоорганизованная критичность и $1/f$ -флуктуации при неравновесных фазовых переходах // Журн. эксперим. и теорет. физики. 2001. Т. 119, вып. 3. С. 613–620.

5. **Anders A.** The fractal nature of vacuum arc cathode spots // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. V. 33, N 5. P. 1456–1464.
6. **Hladky K., Dawson J. L.** The measurement of localised corrosion using electrochemical noise // Corros. Sci. 1981. V. 21, N 4. P. 317–322.
7. **Жуков М. Ф., Дандарон Г.-Н. Б., Замбалаев Ж. Ж., Федотов В. А.** Исследование поверхностных разрядов в электролите // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1984. Т. 4, вып. 1. С. 100–104.
8. **Sannikov V. I., Averin S. A., Sulimov E. M., et al.** The deuterium attack of titanium electrodes under electric discharge conditions // Materials Corros. 1997. V. 48. P. 1–8.
9. **Коверда В. П., Скоков В. Н.** Функции распределения при масштабных преобразованиях $1/f$ -флуктуаций // Докл. РАН. 2003. Т. 393, № 2. С. 184–187.

Поступила в редакцию 30/III 2006 г.
