

04; 08

© 1990 г.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ В ВЫСОКОТОЧНЫХ ДУГАХ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ КОНВЕКЦИЕЙ

Г. Г. Шишкин,¹ Г. Р. Джоунз,² С. Тейлор²

Проведено исследование временных изменений параметров импульсных высокотоочных дуг ($I_{\text{пик}} \leq 50$ кА, $\tau \sim 6$ мс) с дутьем (SF_6 , воздух, $P \sim 1.0$ МПа). Рассмотрены флуктуации давления газа, тока, напряжения, магнитного поля, оптического излучения. На основе использования методов анализа нестационарных случайных процессов определена корреляция между различными парами параметров дуги. Установлено наличие бегущих акустических волн, временных сдвигов между различными процессами и определены доминирующие моды колебаний.

Введение

Комбинации таких эффектов, как собственное магнитное поле дуги, воздействующее на плазменный столб, джоулев нагрев, вызывающий заметные неоднородности плазменных параметров, существование пограничных сдвиговых слоев и потоков, резонансные явления в системе дуга—электрическая цепь являются основными причинами появления нестабильностей. Эти нестабильности приводят к флуктуации различных параметров дуги и генерации электромагнитных полей на различных длинах волн. Кроме чисто электромагнитных, в дугах существуют флуктуации тока, напряжения, оптического излучения и давления [1–3].

Настоящая работа связана со статистическим анализом параметров импульсных дуг, измеренных синхронно в выбранные интервалы времени. В качестве рабочих газов в дугах с током до 60 кА использовались потоки воздуха или элегаза (SF_6). Анализ проводился в диапазоне частот $10^2 \dots 5 \cdot 10^6$ Гц. Большинство физических флуктуационных параметров дуг попадает в класс случайных процессов, чьи статические свойства изменяются во времени, т. е. эти процессы являются нестационарными. В настоящее время не существует полностью адекватной методологии для анализа всех типов нестационарных процессов. Однако на практике часто представляет интерес не полная совокупность экспериментальных данных во всей области значений, а несколько наиболее характерных реализаций. Для рассматриваемых нестационарных случайных процессов применение процедуры усреднения по времени дает приемлемые и значимые результаты. Использованный метод дает возможность определить корреляцию между различными флуктуационными параметрами дуг, выделить регулярные колебания на фоне шумов, сделать заключения о пространственно-временных свойствах рассматриваемых явлений.

Анализ случайных процессов в дугах

Физическое явление при рассмотрении с позиций теории случайных процессов можно описать в любой момент времени путем осреднения величин по множеству выборочных функций $y(t)$, составляющих данный случайный процесс

¹ Московский авиационный институт.

² Ливерпульский университет (Англия).

$\{j(t)\}$ (фигурные скобки означают ансамбль выборочных функций) [1]. В рассматриваемых импульсных дугах характеристики флуктуаций представляют собой нестационарный процесс, поскольку эти флуктуации параметров дуги являются функциями времени, которые можно определить только осреднением мгновенных значений по ансамблю выборочных функций, формирующих процесс. В общем случае анализ нестационарных случайных процессов очень сложен, однако в рассматриваемых условиях изучаемые флуктуации можно описать нестационарным случайным процессом $\{x(t)\}$, каждая выборочная функция которого имеет вид $x(t) = A(t) \cdot y(t)$, $y(t)$ — выборочная функция стационарного случайного процесса $\{y(t)\}$, $A(t)$ — детерминированный временной множитель. В данном случае $A(t)$ определяются либо основной полуволной импульса тока дуги, либо импульсом напряжения во время горения дуги, либо изменениями давления по масштабу времени, близкими к длительности импульса тока. На эти медленные изменения накладываются более высокочастотные флуктуации, которые и являются предметом исследования. Таким образом, рассматриваемые флуктуации относятся к классу нестационарных случайных процессов, выборочные функции которых обладают общим детерминированным трендом. В этом случае для описания такого процесса нет необходимости производить осреднение по ансамблю. Различные требуемые характеристики процесса можно оценить по одной выборке, как и для эргодических процессов, при этом эта выборка может быть произведена не на всем интервале изменения (существования) тока дуги, давления, напряжения и т. д., а на части этого интервала. Например, если длительность тока дуги ~ 6 мс, то длительность выборочной функции может быть значительно меньше, все определяется характерным временем (скоростью) изменения (своего рода периодом) значений параметра флуктуаций.

Таким образом, при изучении флуктуаций параметров дуги можно считать, что они представляют собой нестационарный случайный процесс $\{x(t)\}$ вида

$$\{x(t)\} = A(t) \cdot \{y(t)\}, \quad (1)$$

где $A(t)$ — детерминированный НЧ тренд, определяемый средним значением изменяющегося во времени параметра дуги; $y(t)$ — выборочная функция стационарного более высокочастотного случайного процесса $\{y(t)\}$.

В данной работе стационарность выборочных функций $y(t)$ проверялась с помощью критерия серий. При таком представлении рассматриваемых случайных процессов для статистической оценки корреляции между различными временными функциями $x(t)$, описывающими флуктуации параметров плазмы, могут быть использованы авто- и взаимокорреляционные функции. В соответствии с выше сказанным нестационарная корреляционная функция $R(\tau, t)$ может быть разделена на две составляющие (высокочастотную и низкочастотную) следующим образом:

$$R(\tau, t) = R_1(t) \cdot R_2(\tau), \quad (2)$$

где $\tau = t_2 - t_1$, $t = (t_1 + t_2)/2$, t_1 и t_2 — два произвольно взятых момента времени на рассматриваемой временной реализации $y(t)$; $R_2(\tau)$ — стационарная корреляционная функция высокочастотного процесса; $R_1(t)$ — медленно меняющийся во времени масштабный фактор (низкочастотная составляющая процесса).

Если изменения $A(t)$ и $R_1(t)$ очень медленны во времени по сравнению с наименьшей частотой в $\{y(t)\}$, то $A(t)$ и $R_1(t)$ могут быть отделены от процесса $\{y(t)\}$ посредством низкочастотной фильтрации с использованием единственной реализации $\{x(t)\}$. Такая операция фильтрации физически может быть реализована несколькими способами, включая операцию исключения полиномиального тренда, что было и использовано в данной работе. Используемые реализации имели достаточную временную длину, что позволяло отделить тренд от случайных флуктуаций. После исключения тренда временная реализация случайного процесса имела нулевое среднее значение.

Экспериментальные условия

В экспериментах производились одновременные мгновенные изменения тока дуги I , напряжения на ее зажимах U , собственного магнитного поля B_w , оптического излучения V_ϕ и давления P в различных областях потокоформирующего сопла (рис. 1, 2). Измерения флуктуаций давления выполнялись как при наличии дуги, так и при ее отсутствии.

Условия проведения экспериментов были полностью аналогичны тем, что описаны в [1-3]. Система подачи газа содержала объем с высоким давлением газа (7 атм), который был соединен с кубической дуговой камерой, имеющей

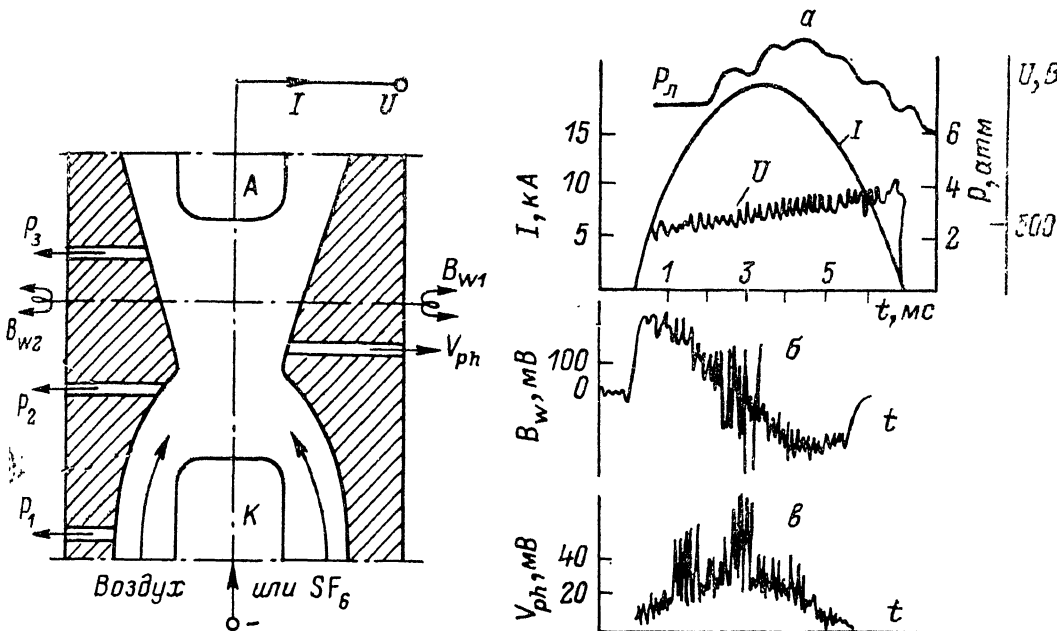


Рис. 1. Схема экспериментального узла.

Рис. 2. Осциллограммы тока дуги I , напряжения U , давления газа P , сигнала на магнитном зонде B_w и интегрального оптического излучения V_ϕ .

трубопровод к резервуару с низким давлением (1 атм). Формирование газового потока производилось с помощью сопла из тефлона с диаметром горловины 35 мм (рис. 1). Для обеспечения зажигания основной дуги использовался иницирующий разряд с током ~ 800 А. Импульс основного тока дуги представлял собой полусинусоиду ($f=70$ Гц) (рис. 2, а). В литературе имеется достаточно много информации по изучению различных аспектов протекания рабочих процессов в рассматриваемых дугах [3]. В данной работе ток, напряжение, давление (рис. 2, а) и полное оптическое излучение (рис. 2, с) были определены совместно с измерением собственного магнитного поля (рис. 2, б). Характеристики магнитного поля измерялись с помощью экранированных катушек, содержащих 2 витка диаметром 60 мм, которые располагались с внешней стороны дуговой камеры в стеклянных прозрачных окнах. Значение параметров дуги фиксировалось осциллографами типа Tektronix, помимо этого, измеряемые величины поступали для записи в компьютер РДРП.

Корреляционный анализ экспериментальных результатов

Анализ флуктуаций давления рабочего газа был выполнен при наличии дуги и при ее отсутствии. Как уже указывалось, флуктуации давления, как и другие параметры, являются статистическими процессами. Для выделения ре-

гулярных составляющих на фоне шума были использованы автокорреляционные функции. Автокорреляционные функции позволили выделить в потоке SF_6 газа без дуги колебания с частотой 93. . 96 Гц в области зонда P_1 (рис. 3) и 63. . 70 Гц в районе P_3 . Используя результаты измерения параметров флуктуаций давления (рис. 3, а) вдоль оси дуги, из авто- и взаимокорреляционных функций может определить характер акустического возмущения. В рассматриваемом случае (рис. 3, б) наличие смещения максимума взаимокорреляционной функции относительно максимума автокорреляционной говорит о распространении волны в направлении от P_1 к P_2 . Скорость распространения возмущений вдоль оси равна $v_s = l/\tau$ и составляет величину 50. . 60 м/с, где l — расстояние между зондами P_1 и P_2 , τ — время задержки сигнала на P_2 относительно P_1

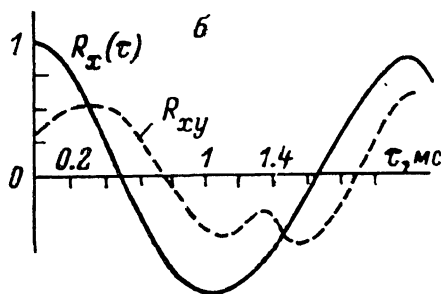
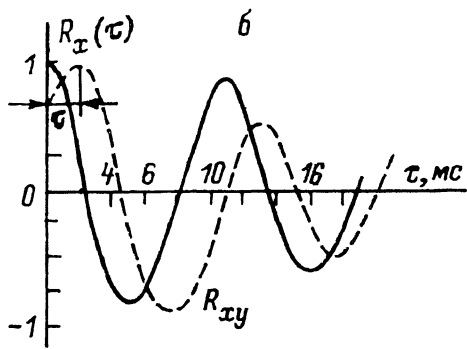
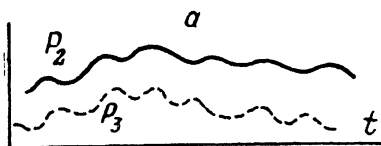
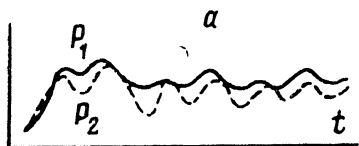


Рис. 3. Корреляционные функции флуктуаций давления на зондах P_1 и P_2 .
б: $x - P_1$; $y - P_2$.

Рис. 4. Корреляционные функции флуктуаций давления на зондах P_2 и P_3 .
б: $x - P_3$, $y - P_2$.

(рис. 3). Наличие дуги сильно изменяет спектр флуктуаций давления. Процесс значительно усложняется. Возмущения давления и в этом случае часто являются бегущими, но при некоторых значениях пикового тока, особенно когда происходит блокирование сопла, наблюдаются стоячие акустические волны. Типичные частоты колебаний давления для элегазовой дуги с $I_{\text{пнк}} = 56$ кА равны 0.47. . 2.5 кГц на зонде P_3 и 1.2. . 6 кГц на зонде P_1 (рис. 3, а; 4, а). В области дуги волна с частотой 570 Гц распространяется со скоростью $v_s \approx -60$. . 80 м/с, т. е. в этом случае волна бежит в направлении, противоположном первоначальному потоку газа (рис. 4, б). В области расположения зондов P_1 и P_2 существует стоячая волна с частотой 1.3. . 1.4 кГц, что связано, вероятно, с блокировкой сопла. Поведение акустических волн определяется величиной $I_{\text{пнк}}$, градиентами давления как вверх, так и вниз по потоку. Бегущие и стоячие волны появляются при различных условиях горения дуги и могут распространяться как вверх, так и вниз по потоку. Поведение акустических возмущений в воздушной среде аналогично, но частоты выше (примерно до 10 кГц).

Корреляция между флуктуациями давления P_2 в воздухе и напряжением дуги U наблюдалась на частотах 2. . 8 кГц. Взаимокорреляционные функции между P_2 и U показывают, что эти флуктуации противофазны. Флуктуации давления на частотах $f \sim 3.1$. . 3.2 кГц для элегазовой дуги ($I_{\text{пнк}} = 34$ кА) возникают раньше на время $\tau \sim 45$ мкс, чем колебания интегрального оптического излучения V_ϕ . Анализ корреляции между колебаниями (рис. 5, а) оптического излучения и магнитным полем показывает, что флуктуации V_ϕ запаздывают от-

носительно B_W (рис. 5, б). Характерно то, что сначала возникают колебания B_W на более высоких частотах, а потом развиваются осцилляции на более низких (на частотах, соответствующих частотам возмущения давления). Например, в элегазовой дуге сначала развиваются колебания на частоте $f \sim 50$ кГц, а спустя примерно период этой частоты ($\tau \sim 20$ мкс) начинаются колебания с $f \sim 5 \dots 6$ кГц (рис. 5, а). Частоты возмущений давления (0.5 ... 10 кГц) наблюдаются в спектре флуктуаций V_{ϕ} , B_W (рис. 5), U и I .

Иницирующие дуги. Взаимокорреляционные кривые U

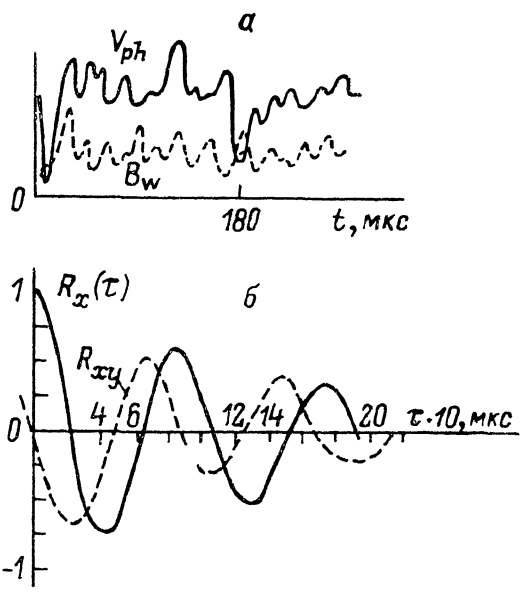


Рис. 5. Корреляция между флуктуациями оптического излучения и сигнала на магнитном зонде.

б: $x - V_{ph}$, $y - B_W$.

и тока I показывают, что эти колебания противофазны на частотах $f \sim 12 \dots 16$ кГц (SF_6 дуги) и $f \sim 10 \dots 12, 28 \dots 32$ кГц (воздушные дуги) (рис. 6).

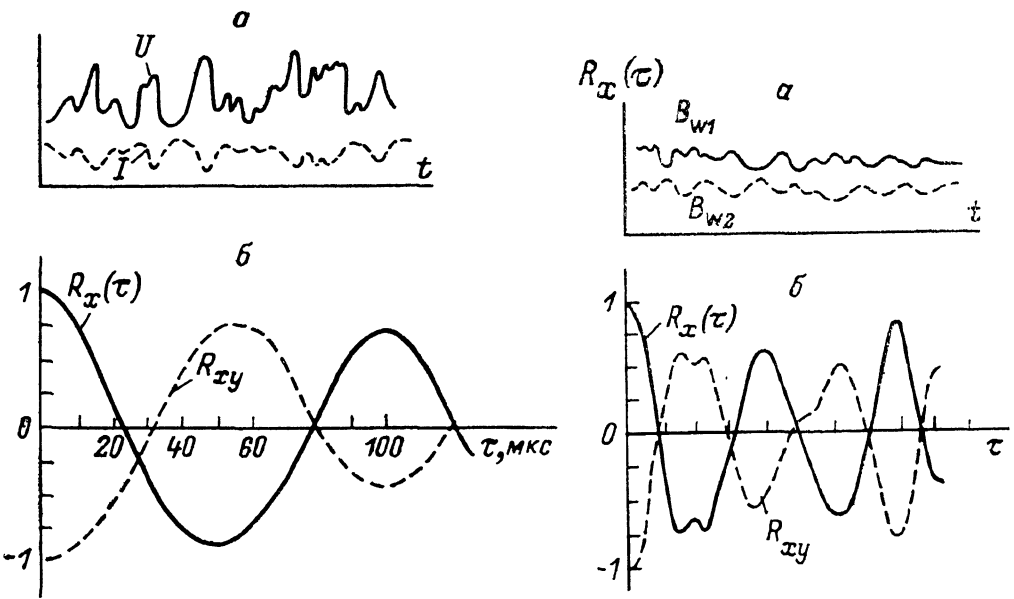


Рис. 6. Корреляционные функции флуктуаций тока и напряжения дуги.

б: $x - I$, $y - U$.

Рис. 7. Связь между колебаниями, измеряемых с диаметрально противоположных точек дуги.

а: масштаб 0 16 мс; б: $x - B_{W1}$, $y - B_{W2}$.

Колебания тока I и давления P синфазны на частотах 8 ... 10 кГц. Противофазность U и I для воздушных и элегазовых дуг в диапазоне частот $\sim 10 \dots 30$ кГц говорит о том, что дуга обладает максимальным значением отрицательного динамического сопротивления на указанных частотах, а это в свою очередь озна-

чает, что система дуга—цепь электропитания является в принципе неустойчивой (рис. 7). I , V_ϕ и P на частотах $f \sim 3 \dots 10$ кГц для воздушных дуг и на $f \sim 2 \dots 6.0$ кГц для элегазовых, а также V_ϕ и I на $f \sim 12 \dots 16$ кГц (SF_6) и $f \sim 10 \dots 12, 28 \dots 32$ (воздух) синфазны. Спектр флуктуаций B_w и V_ϕ простирается до нескольких мегагерц.

Обсуждение результатов

Проблема возбуждения возмущений давления обсуждалась Г. Р. Джоунзом и др. [2]. Однако авторы [2] не затрагивали проблему распространения волн. Ими по сути дела рассмотрено возникновение акустических резонансов в условиях дуг размыкателей цепи. В данной работе показано наличие распространения возмущений, т. е. наличие акустических волн и определена скорость их распространения. При движении газа через сопло скорость звука относительно неподвижной системы отсчета может быть получена путем сложения скорости самого газа со скоростью звука в нем. Если скорость течения больше скорости звука, то возмущение не может передаваться вверх по течению, а при

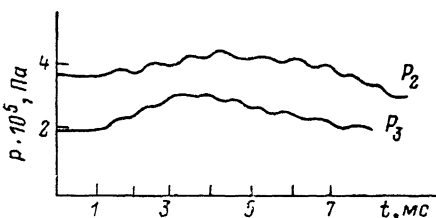


Рис. 8. Временная зависимость давления в области горения дуги.

дозвуковой скорости потока звуковые волны могут распространяться вверх по потоку. При горении дуги с $I_{\text{пик}} = 56$ кА, как указано выше, возмущение распространяется от зонда P_3 к P_2 , т. е. вверх по потоку и $U_n < U_s$, т. е. $U_n = U_s - U_n$.

В рассматриваемых условиях скорость звука в воздушном потоке ($\gamma = 1.4$) равна $U_s = 341$ м/с, а в элегазе SF_6 ($\gamma = 1.09$) $U_s = 135$ м/с. Скорость потока нетрудно вычислить из уравнения $\rho (dV_n/dt) = -\text{grad } P$, где ρ — плотность потока газа, P — давление, V_n — скорость потока газа. При пиковом токе элегазовой дуги $I_{\text{пик}} = 56$ кА изменение давления во времени на зондах P_2 и P_3 приведено на рис. 8. Видно, что в районе пика тока дуги $t \sim 3$ мс градиент давления $\Delta P = P_2 - P_3 \approx 0.5$ атм ($0.5 \cdot 10^5$ Па) и скорость потока $V_n \approx \sqrt{2\Delta P/\rho} \approx 75$ м/с, тогда $U_n \approx -60$ м/с. Таким образом, расчетное значение скорости возмущений в элегазовой дуге и результаты измерений достаточно близки.

Полный спектр флуктуаций параметров дуги может быть разделен на три области: 1) $f \sim 10^2 \dots 10^4$ Гц, 2) $f \sim 10^4 \dots 10^5$ Гц, 3) $f > 10^5$ Гц. Первая область связана как с колебаниями давления, так и гармониками основной частоты питания дуги, взаимодействие которых вызывает сложный спектр флуктуации всех параметров дуги. Колебания I , B_w , U , V_ϕ в частотном диапазоне $10 \dots 35$ Гц для воздуха и $12 \dots 20$ кГц для элегаза, вероятно, связаны с анизотропной неустойчивостью [1], которая может быть причиной вращения плазмы дуги. Взаимная корреляция (рис. 7, б) колебаний B_{w1} и B_{w2} иллюстрирует это вращение. Колебания первой и второй групп взаимосвязаны. Можно предположить, что динамические волны давления воздействуют на ток и все другие параметры дуги, на давление собственного магнитного поля. Вероятно, колебания третьей группы связаны с процессами в пятнах и электронной двухпоточковой неустойчивостью.

Авторы благодарят Британский совет и факультет электротехники и электроники Ливерпульского университета за содействие в выполнении данной работы и М. Бобкова за помощь в вычислениях.

Список литературы

- [1] *Jones G. R., Shishkin G. C., Taylor S.* // XIX. ICPIG. Belgrade, 1989. P. 714—715.
- [2] *Leclerc J. L., Smith M. R., Jones G. R.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1980. Vol. VPS-8. N 4. P. 376.
- [3] *Jones G. R., Leclerc J. L., Smith M. R.* // Proc. IEEE. 1982. Vol. 129. Pt A. N 8. P. 611—617.
- [4] *Бендат Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974.

Московский авиационный институт
им. Серго Орджоникидзе
Научно-исследовательский институт
прикладной электродинамики

Поступило в Редакцию
14 сентября 1988 г.
В окончательной редакции
16 января 1990 г.

