

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ КОЛЕБАНИЙ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ ДУГИ И ЯРКОСТИ СТРУИ ПЛАЗМОТРОНОВ ВИХРЕВОЙ СХЕМЫ

А. С. Аньшаков, Г. Ю. Даутов, А. Н. Тимошевский

(Новосибирск)

Приводятся экспериментальные результаты о характере пульсаций тока, I_t , напряжения дуги U_t и яркости струи B_t на выходе из плазматрона. Показано, что функции распределения указанных параметров подчиняются закону нормального распределения.

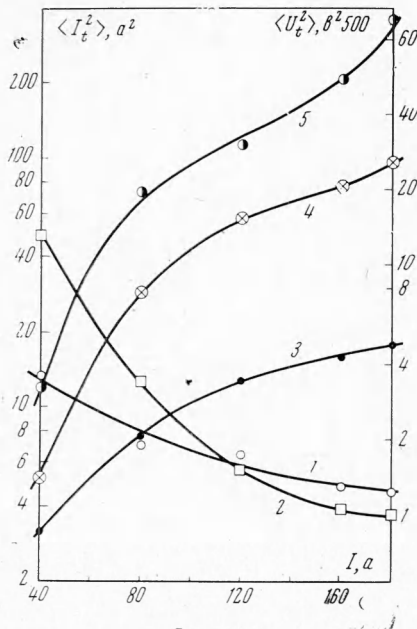
Показано влияние элементов цепи и внешней характеристики источника питания на колебания исследуемых параметров плазматрона.

В электродуговых подогревателях вихревой схемы с самоустанавливающейся длиной дуги пульсации параметров потока нагреваемого газа определяются нестабильностью электрических параметров плазматрона и источника питания. Пульсации электрических параметров таких типов плазматронов обусловлены в основном шунтированием дуги.

Однокамерный плазматрон с вихревой газовой стабилизацией (рабочая среда — воздух, электроды медные, охлаждаемые водой) питался от источников постоянного тока с номинальным напряжением 4200 или 825 в. Длина выходного электрода составляла 30 см для $d = 1$ см и 80 см для $d = 2$ см. Для снятия функций распределения f_i , f_u , f_b использовался амплитудный статистический анализатор импульсов типа АИ-100-1 совместно с преобразователем. Исследуемые сигналы от плазматрона через разделительный конденсатор подаются на преобразователь, который преобразует непрерывный сигнал в последовательность импульсов длительностью 1 мксек, а амплитуда u' пропорциональна мгновенному значению сигнала. Частота следования u' составляла 10 кГц.

Для измерения пульсаций яркости струи использовался фотоумножитель типа ФЭУ-36. Здесь яркостью струи будем называть интегральный поток излучения, воспринимаемый фотоумножителем. (Ниже B_t будет измеряться в единицах напряжения u' на выходе преобразователя, которое пропорционально воспринимаемому фотоумножителем потоку излучения.) Яркость струи измерялась на расстоянии 1 см от среза выходного электрода. Чтобы исключить влияние наводок от сети (50 Гц) и колебаний источника питания на результаты экспериментов, в схему преобразователя включался фильтр с частотой среза 300 Гц.

Анализ осциллограмм функций распределений, снятых с экрана АИ-100-1 на пленку, показал, что f_i , f_u и f_b , как и в [1], подчиняются закону нормального распределения



Фиг. 1

во всем исследованном диапазоне измерений I , G , d как при прямой полярности (выходной электрод — анод), так и при обратной (выходной электрод — катод); здесь I , U , B — осредненные по времени значения тока, напряжения дуги и яркости струи, индексами s отмечены мгновенные значения этих величин. Средний квадрат отклонений напряжения, тока дуги и яркости струи определяется по известным соотношениям

$$\langle I_t^2 \rangle = 1/2 l_i, \quad \langle U_t^2 \rangle = 1/2 l_u, \quad \langle B_t^2 \rangle = 1/2 l_b$$

Полученные значения $\langle U_t^2 \rangle$, $\langle I_t^2 \rangle$ и соответственно величины

$$U^* = \sqrt{\langle U_t^2 \rangle} / U \cdot 100\%, \quad I^* = \sqrt{\langle I_t^2 \rangle} / I \cdot 100\%$$

а также G , d , I приведены в таблице. Следует заметить, что точность определения

l_u, l_i, l_b зависит в основном от нелинейности характеристики преобразователя, которая составляла не более 10%.

На фиг. 1 приведены зависимости средних квадратов отклонений $\langle U_t^2 \rangle$ (кривые 1, 2 для $G = 6, 24 \text{ г.сек}^{-1}$ соответственно) и $\langle I_t^2 \rangle$ (кривые 3, 4, 5 для $G = 6, 12, 24 \text{ г.сек}^{-1}$) от тока при $d = 2 \text{ см}$. Из таблицы и данной фигуры видно, что пульсации напряжения с ростом тока уменьшаются. Причина уменьшения $\langle U_t^2 \rangle$ заключается в снижении напряжения пробоя промежутка дуговая плазма — анод [2]. Частично этим же [3,4] объясняется уменьшение средних квадратов отклонений яркости (фиг. 2, где кривые 1, 2, 3 соответствуют $G = 6, 12, 24 \text{ г.сек}^{-1}$, $d = 2 \text{ см}$), если принять во внимание зависимость пульсаций яркости струи от колебаний мощности дуги. Другой причиной уменьшения $\langle B_t^2 \rangle$ при увеличении I является, по-видимому, уменьшение длины дуги и, следовательно, диффузия высокотемпературных сгустков дуговой плазмы до выхода из плазматрона.

Анализ экспериментальных данных, приведенных в таблице, показывает, что при токах до 120 а с ростом расхода газа $\langle U_t^2 \rangle$ возрастает. При дальнейшем увеличении тока ($I > 120 \text{ а}$) $\langle U_t^2 \rangle$ с ростом G уменьшается (фиг. 1). Причины такого поведения $\langle U_t^2 \rangle$ не выяснены и требуются дополнительные исследования. Несколько неожиданным оказался рост $\langle I_t^2 \rangle$ с увеличением тока дуги. Этот факт может быть объяснен исходя из следующего рассмотрения.

$I, \text{ а}$	$U, \text{ в}$	$\langle U_t^2 \rangle, \text{ в}^2$	U^*	$\langle I_t^2 \rangle, \text{ а}^2$	I^*	$G, \text{ г.сек}^{-1}$	$d, \text{ см}$		
40	660	2000	6.8	12	8.7	6	1		
80	540	1050	6.0	29	6.7				
120	495	700	5.3	42	5.4				
160	450	675	5.8	57	4.7				
180	435	640	5.8	69	4.6				
40	960	2500	5.2	34	14.6				
80	720	1150	4.7	78	11.0	12	1		
120	645	730	4.2	108	8.7				
160	585	615	4.2	130	7.1				
180	570	520	4.0	150	6.8				
40	1030	1800	4.1	3.3	4.5			6	2
80	675	975	4.6	7.8	3.5				
120	570	865	5.2	13	3.0				
160	465	650	5.5	16	2.5				
180	450	625	5.6	18	2.4				
40	1180	2050	3.8	5.2	5.7	12	2		
80	825	1020	3.9	29	6.7				
120	750	700	3.5	58	6.4				
160	676	615	3.7	78	5.5				
180	660	575	3.6	96	5.4			18	2
40	1320	5000	5.4	9.5	7.7				
80	940	1300	4.0	52	9.0				
120	810	625	3.1	96	8.2				
160	766	550	3.1	150	7.7				
180	750	525	3.1	230	8.4	24	2		
40	1440	6500	5.6	12	8.7				
80	1000	1700	4.1	74	10.8				
120	885	750	3.1	115	8.9				
160	840	525	2.7	210	9.0				
180	825	500	2.7	360	10.5				

Для системы дуга — источник питания, пренебрегая индуктивностью цепи и считая внешнюю характеристику источника жесткой, можно написать следующие уравнения:

$$U_b = (I + I_t + CdU_t/dt) R + U + U_t$$

$$U_b = IR + U$$

Отсюда

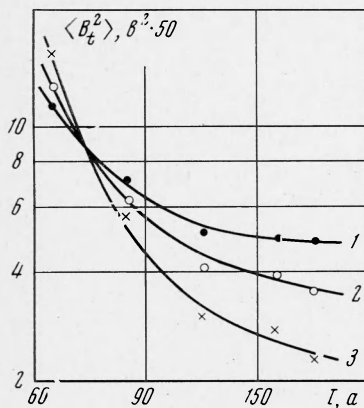
$$I_t = -U_t I / (U_b - U) - CdU_t/dt \quad (1)$$

При $C = 0$

$$I_t = -U_t I / (U_b - U), \quad \langle I_t^2 \rangle = [I / (U_b - U)]^2 \langle U_t^2 \rangle \quad (2)$$

При изменении I от 40 до 180 а (фиг. 1, $G = 6 \text{ г.сек}^{-1}$, $d = 2 \text{ см}$) $\langle U_t^2 \rangle$ уменьшается от 1750 до 625 в². При этом U понижается от 1030 до 450 в и расчетные значения $\langle I_t^2 \rangle$ для $U_b = 4200 \text{ в}$ повышаются от 0.28 до 1.45 а², т. е. примерно в 5.2 раза, а экспериментальные значения $\langle I_t^2 \rangle$ повышаются приблизительно в 5.6 раза. Однако экспериментальные значения $\langle I_t^2 \rangle$, как видно из фиг. 1, почти на порядок выше расчетных, т. е. формула (2), которая не учитывает влияния шунтирующей емкости, хотя и правильно отражает направление изменения $\langle I_t^2 \rangle$ в зависимости от I , количественно не согласуется с экспериментом.

Таким образом, на I_t существенное влияние оказывают параметры цепи. В момент шунтирования U_t резко уменьшается и $dU_t/dt < 0$, при этом второй член в (1) мо-



Фиг. 2

12 ПМТФ, № 5

жет значительно превышать первый. Так, если время плавного увеличения U_t составляет порядка 10^{-3} сек, $C = 2 \cdot 10^{-6}$ ф, $U_b = 4200$ в, $U_t \sim 60$ в, $I = 120$ а, $U = 360$ в (один из режимов работы плазмотрона), то

$$U_t I / (U_b - U) \approx -1.19a, \quad CdU_t / dt \approx -0.12a$$

в то время как при тех же условиях, но времени резкого уменьшения U_t порядка $5 \cdot 10^{-6}$ сек

$$U_t I / (U_b - U) \approx 1.9a, \quad CdU_t / dt \approx 24a$$

Здесь U_b — напряжение источника питания, C — емкость в цепи.

Следовательно, в момент пробоя дуга — стенка или дуга — дуга I_t резко повышается в основном за счет разряда шунтирующей емкости. Кроме того, наряду с крупномасштабными пульсациями напряжения существуют и мелкомасштабные, которые, как показали осциллограммы напряжения и тока дуги, оказывают значительное влияние на $\langle I_t^2 \rangle$.

Полагая, что I_t является однозначной функцией U_t , выражение для $\langle I_t^2 \rangle$ с учетом C принимает вид

$$\langle I_t^2 \rangle = \left[\frac{dI_t(U_t)}{dU_t} \right]_{U_t=0}^2 \langle U_t^2 \rangle$$

В момент шунтирования $U_t = A \exp(-t/r, C)$, поэтому

$$\langle I_t^2 \rangle = \frac{I^2}{U^2} \left(\frac{U_b - 2U}{U_b - U} \right)^2 \langle U_t^2 \rangle \quad (3)$$

Количественный расчет по формуле (3) дает лучшее согласие с экспериментальными значениями $\langle I_t^2 \rangle$. Например, при $I = 40a$, $U = 1030$ в ($G = 6$ г·сек $^{-1}$, $d = 2$ см) расчетное значение $\langle I_t^2 \rangle \sim 1.3a$, а экспериментальное — $3.3a$ (фиг. 1). Таким образом, в точных расчетах $\langle I_t^2 \rangle$ следует учитывать шунтирующую емкость и пульсации напряжения при шунтировании дуги.

Следует заметить, что при питании плазмотрона от различных источников ($U_b = 4200$ в и $U_b = 825$ в) не было заметных изменений характера колебаний U_t , в то время как из (1) следует, что I_t существенно зависит от внешней характеристики источника питания, и было подтверждено при анализе осциллограмм U_t и I_t . Оказалось, что в случае работы плазмотрона от источника с $U_b = 825$ в решающее влияние на характер колебаний тока оказывает первый член в (1).

В экспериментах были замечены значительные колебания тока плазмотрона, вызванные колебаниями источника питания. С учетом изменения U_b^* из (1) будем иметь

$$I_t = U_{bi} I / (U_b - U) - U_t I / (U_b - U) - CdU_t / dt \quad (4)$$

Отсюда видно, что при увеличении тока I_t может достигать больших значений и влиять на устойчивость работы плазмотрона и пульсации параметров потока нагреваемого газа.

Проведенный анализ осциллограмм $I + I_t$, когда источник питания ($U_b = 825$ в) нагружен на реостат и при работающем плазмотроне, показывает, что при одном и том же токе в цепи пульсации I_t значительно возрастают при работе плазмотрона. На другом источнике ($U_b = 4200$ в) величина $U_t I / (U_b - U)$ была незначительна.

Таким образом, в исследованном диапазоне изменения параметров однокамерного плазмотрона вихревой схемы функции распределения колебаний тока, напряжения дуги и яркости струи подчиняются закону нормального распределения. Указанный вид функций распределения не зависит от полярности электродов плазмотрона. Среднеквадратичные значения $\langle U_t^2 \rangle$ и $\langle I_t^2 \rangle$ уменьшаются с увеличением I , а значения $\langle I_t^2 \rangle$ возрастают. На характер колебаний I_t значительное влияние оказывают параметры цепи питания и внешняя характеристика источника.

Поступила 19 IX 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. А н ь ш а к о в А. С., Д а у т о в Г. Ю., М у с т а ф и н Г. М., П е т р о в А. П. Исследование пульсаций в плазмотроне с самоустанавливающейся дугой. ПМТФ, 1967, № 1.
2. Д а у т о в Г. Ю., Ж у к о в М. Ф., М у с т а ф и н Г. М., Т и м о ш е в с к и й А. Н. Исследование электрического пробоя промежутка дуговая плазма — холодный электрод. ПМТФ, 1969, № 2.
3. J o r d o n G. R. K i n g L. A. The nature of fluctuations present in d.c. plasma jets in argon and nitrogen. British J. Appl. Phys., 1965, vol. 16, No 4.
4. Т р о х а н А. М. Фотографические исследования пульсаций в плазмотронах с воздушной стабилизацией. ПМТФ, 1964, № 2.