

УДК 621.778.073

к.т.н. Брожко Р. Н.,
к.т.н. Руднев Е. С.
(ДонГТУ, г. Лисичанск, Україна)

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И РЕСУРСНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ – ПЛАЗМОТРОН НА ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕГО РАБОТЫ

Рассмотрена инженерная методика расчета параметров системы источник питания – плазмотрон, позволяющая повысить устойчивость системы источник питания–плазмотрон за счет снижения величины возмущения тока дуги при случайных малых изменениях напряжения источника питания. Приведено теоретическое исследование характеристик плазмотрона при воздействии на столб дуги возмущающего переменного напряжения, полученные при этом аналитические зависимости могут быть использованы при проектировании плазмотронов для напыления, наплавки и резки.

Ключевые слова: плазменная струя, пульсации, электрод, распределение тока дуги, амплитуда импульсов.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

В промышленности наибольшее применение в качестве напыляемых и наплавляемых материалов нашли порошки, которые могут быть приготовлены практически из любых материалов. Для этих целей используют как стандартные порошки с частицами размером 40 – 300 мкм, так и специальные сфероидизированные с выдержанной в узких пределах грануляцией и с хорошей сыпучестью. Время пребывания частиц в плазме составляет $\sim 10^{-3}$ с и часто оказывается недостаточным для полного плавления на всю глубину частиц материалов с низкой теплопроводностью. Кроме того, немногие из применяемых плазмообразующих газов эффективно передают теплоту нагреваемому порошку [2,3].

Порошок вместе с транспортирующим газом подают непосредственно или в дугу, или в плазменную струю (в зависимости от конструкции плазмотрона). Под действием сил инерции и газодинамических сил частицы порошка проникают в поток плазмы, нагреваются и ускоряются струей плазмообразующих газов. Образующийся при этом двухфазный поток, состоящий из

плазмы и частиц порошка, распределяемых в плазме, определяют не только их нагрев и ускорение, но и условия формирования покрытия и его толщину.

Особенности нагрева порошка в плазме достаточно подробно рассмотрены в [2,3] и были учтены при разработке плазмотронов для напыления и наплавки. При этом усовершенствования конструкций плазмотронов, в основном, направлены на улучшение равномерности распределения порошка в плазменной струе, на увеличение скорости движения частиц порошка, на повышение КПД нагрева порошка и ресурса работы плазмотрона.

Изменение параметров плазменной струи могут быть периодическими и непериодическими. Пульсации, связанные с изменением периодических параметров, происходят с низкой и высокой частотой. Низкочастотные пульсации вредны для процессов порошкового напыления и наплавки, так как они вызывают нестабильность свойств покрытий. Эти пульсации в основном обусловлены источником питания плазмотрона и эрозией электродов. Повышение стойкости электродов и при-

© Брожко Р. Н., 2018

© Руднев Е. С., 2018

менение источников питания со стабилизацией выходных параметров может существенно повысить качество и стабильность свойств плазменных покрытий.

Непрерывное горение дуги в плазмотронах обеспечивается лишь в том случае, если электрические параметры дуги и источника питания удовлетворяют определенным требованиям – условиям устойчивости, тесно связанным с повышением КПД плазменной установки и выбором оптимальной внешней характеристики источника питания.

Проблема устойчивости системы источник питания – дуга плазмотрона по отношению к малым возмущениям тока рассматривалась во многих работах.

При этом само возмущение предполагалось уже сформировавшимся. В данном случае рассматривается динамика развития возмущения тока дуги, вызванного малыми изменениями напряжения источника питания и скорости расхода подаваемого в плазмотрон газа.

Постановка задачи. Разработка математической модели возмущений тока для типичной схемы питания плазмотрона, показывающая влияние крупно-масштабных пульсаций тока на нагрев напыляемых и наплавляемых порошков. Теоретические исследования характеристик плазмотрона при воздействии на столб дуги возмущающего переменного напряжения.

Изложение материала и его результаты. Рассмотрим математическую модель возмущений тока дуги для простейшей схемы питания плазмотрона, показанной на рисунке 1.

Схема включает источник питания E , балластное сопротивление R , индуктивность L и емкость C , вклад в значения которых делают также элементы схемы запуска дуги. Наиболее применим способ запуска дуги с помощью осциллятора. Внутреннее сопротивление источника питания считаем равным нулю. Следует отметить, что неуправляемая схема выпрямления источника питания ИПН-160/600

имеет минимальный коэффициент пульсации. У тиристорных выпрямителей (типа АПР-404, УПР-201) с изменением угла регулирования тиристоров частота пульсации остается постоянной, амплитуда и коэффициент пульсации сильно изменяются.

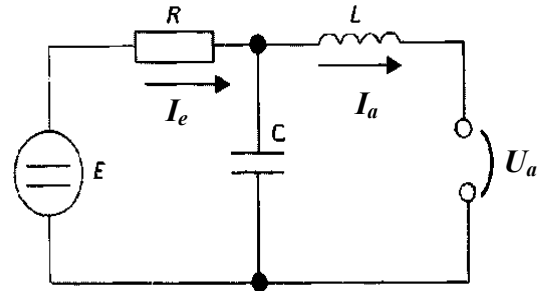


Рисунок 1 – Схема замещения электрической цепи системы источник питания-дуга

Из стационарного режима система может выйти за счет самопроизвольных, случайных возмущений параметров, например, за счет изменения напряжения источника питания на величину $e(t)$ или скорости расхода газа G на $g(t)$. Это приведет к отклонению тока дуги от равновесного значения I_{a0} на величину $i(t)$ и изменению напряжения дуги. Для малых значений отклонений параметров можно записать:

$$\begin{aligned} U_a &= U_{a0} + \left(\frac{\partial U_a}{\partial I}\right)_0 i + \left(\frac{\partial U_a}{\partial G}\right)_0 g = \\ &= U_{a0} + R^* i + \left(\frac{\partial U_a}{\partial G}\right)_0 g, \\ U_a &= \left(\frac{\partial U_a}{\partial I}\right)_0 i + \left(\frac{\partial U_a}{\partial G}\right)_0 g, \end{aligned} \quad (1)$$

где R^* – дифференциальное сопротивление дуги. Его величина отрицательна и в дальнейшем, под величиной R^* будем понимать его модуль.

С помощью уравнения Кирхгофа определяем связь между током и напряжением на элементах цепи, изображенной на рисунке 1:

$$I_e = C U_c + I_a; U_c = L I_a + U_a; E = I_e R + U_c, \quad (2)$$

где индексы e , a и c относятся соответственно к источнику питания, дуге и конденсатору. Штрихами обозначены производные по времени.

После преобразований получим:

$$I_a'' + \frac{1}{RC} I_a' + \frac{1}{LC} I_a = \frac{E}{RCL} - \frac{U_a}{RCL} - \frac{U_a'}{L}. \quad (3)$$

Подставим результаты вычислений уравнения (1) в (3) и получим уравнение для отклонения значений тока от стационарного значения.

$$i'' + 2\beta i' + \omega^2 i = \frac{e}{RCL} - \frac{1}{L} \left(\frac{\partial U_a}{\partial G} \right)_0 \left(g' + \frac{1}{RC} g \right), \quad (4)$$

где

$$\omega^2 = \frac{R - R^*}{RCL}, \quad 2\beta = \frac{L - RCR^*}{RCL} = \frac{\omega^2 L}{R - R^*} - \frac{R^*}{L}.$$

Здесь величина

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{CL}}, \quad (5)$$

которая имеет смысл собственной частоты колебаний тока дуги в колебательном контуре.

При этом уравнение (3) преобразуем к виду:

$$I_a'' + \frac{\omega^2 L}{R} I_a' + \omega^2 I_a = \frac{\omega^2}{R} E - \frac{\omega^2}{R} U_a - \frac{U_a'}{L}. \quad (6)$$

В модели остаются два независимых параметра схемы питания – ω и L . Их выбор определяет и значение емкости C согласно (5).

Рассмотрим изменение тока i и напряжения u относительно их стационарных значений U_{a0} и I_{a0} , для чего в уравнении (6) сделаем замену:

$$I_a = I_{a0} + i; \quad U_a = U_{a0} + u.$$

Тогда с учетом соотношения, определяющего рабочую точку дуги уравнение (6) преобразуем к виду

$$i'' + \frac{\omega^2 L}{R} i' + \omega^2 i = \frac{\omega^2}{R} u - \frac{u'}{L}, \quad (7)$$

а именно, получим линейное неоднородное дифференциальное уравнение второго по-

рядка, которое и является основным уравнением математической модели. Для известной зависимости пульсаций напряжения дуги от времени оно позволяет определить пульсации тока.

Из результатов экспериментов известно, что отдельный импульс пульсаций напряжения, возникающий за счет шунтирования дуги, имеет форму положительного треугольного импульса, время нарастания которого значительно больше, чем спада [3, 4]. Такая форма объясняется тем, что в случае примерно постоянной напряженности электрического поля напряжение на дуге линейно увеличивается с ростом ее длины. Положим, что время нарастания и спада импульса относятся как 9:1.

У плазмотрона с диаметром канала $5 \cdot 10^{-3}$ м и скоростью расхода газа $3 \cdot 10^{-3}$ кг/с при токе $I = 110$ А и напряжении $U = 410$ В среднеквадратичное напряжение пульсаций составляет приблизительно 6 %, т.е. около 25 В. Длительность отдельного импульса близка 1 мс. Импульсы пульсаций образуют непрерывную случайную последовательность, амплитуды в которой распределены по нормальному закону относительно среднего значения напряжения на дуге [3].

В этом случае амплитуды импульсов распределяются по нормальному закону со средним значением пульсаций напряжения $\bar{u} = 2\sigma$ и стандартным отклонением σ . Такое предположение не ограничивает существенно общность модели, сохраняя случайный характер процесса, но приводит к появлению у пульсаций напряжения постоянной составляющей, равной

$$U_0 = \frac{1}{t} \int_0^t u(t) dt. \quad (8)$$

Для получения переменной составляющей пульсаций напряжения нулевой уровень последовательности импульсов должен быть увеличен на это значение.

Для простейшего варианта моделирования такой последовательности импульсов

предположим, что скорость нарастания импульсов остается постоянной (она определяется скоростью сноса дуги потоком газа в канале плазмотрона), а длительность импульсов распределяется по нормальному закону со средним значением $\tau = 1 \cdot 10^{-3}$ с и стандартным отклонением σ_τ . При этом амплитуды импульсов также распределяются по нормальному закону со средним значением пульсаций напряжения $\bar{u} = \sigma_\tau$ и стандартным отклонением $\sigma_u = \alpha \sigma_\tau$, где α – скорость нарастания импульса.

Положим среднее значение амплитуды импульса равным удвоенному среднеквадратичному значению пульсаций напряжения $\bar{u} = 50$ В. Тогда скорость нарастания импульса равна:

$$\alpha = \frac{\bar{u}}{0,9\tau} \quad (9)$$

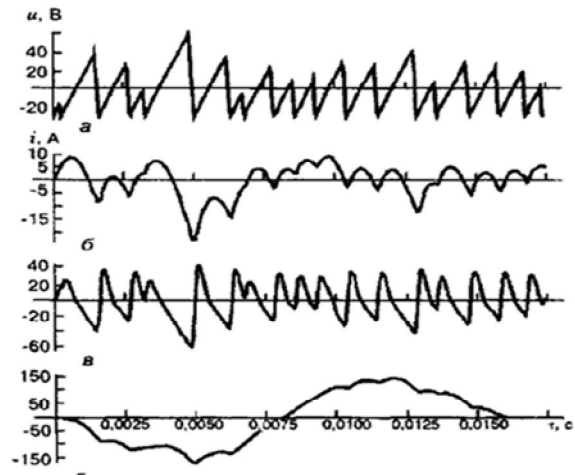
и стандартное отклонение длительности импульсов составит:

$$\sigma_\tau = \frac{\sigma_u}{\alpha} = 0,9 \frac{\sigma_u}{u} \tau = 0,45\tau \quad (10)$$

На рисунке 2 приведен пример полученной таким образом переменной составляющей последовательности из 20 импульсов.

Генерация последовательности случайных чисел, распределенных по нормальному закону $N(\tau; 0,54\tau)$, определяющих длительности импульсов в последовательности, и последующие вычисления выполнялись в пакете Matlab.

Основной целью вычислительного эксперимента является определение пульсаций тока дуги. Подстановка полученной последовательности импульсов пульсаций напряжения в правую часть уравнения (4) и его последующее численное решение позволяет получить зависимости пульсаций тока дуги от времени, подобные тем, которые измеряются в реальном эксперименте.



$a - L = 1,0$ мГн, $\omega\tau = 10,0$; $b - 0,1$ мГн, $\omega\tau = 10,0$; $в - 0,5$ мГн, $\omega\tau = 0,4$

Рисунок 2 - Переменная составляющая случайной последовательности импульсов пульсаций напряжения (а) и вызванные ею пульсации тока дуги (б-в)

На рисунке 2, а-б-в приведены расчеты осциллограмм пульсаций тока дуги при различных значениях индуктивности L и произведения $\omega\tau$ при $R = 1$ Ом (значение $\omega\tau$, равное отношению средней длительности импульса пульсаций τ к обратной собственной частоте системы $\frac{1}{\omega}$, является

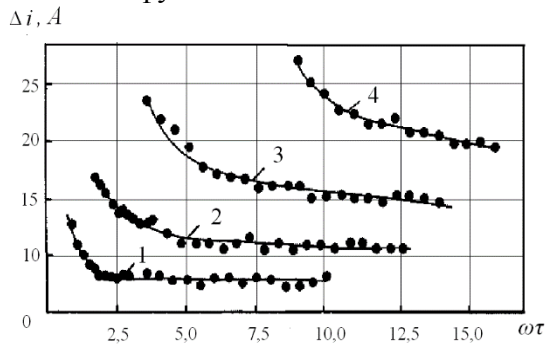
характерным масштабом временных процессов в системе источник питания – дуга). Из этого примера видна зависимость режима работы этой системы от значений параметров цепи. Значения пульсаций тока увеличиваются с уменьшением $\omega\tau$ и индуктивности. В частности, изменение тока, показанное на осциллограмме (рис. 2, в), приведет к гашению дуги (ток в рабочей точке равен 110 А). В качестве количественной меры значений пульсаций тока было выбрано среднеквадратичное значение его переменной составляющей

$$\Delta i = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t i^2(t) dt} \quad (11)$$

которое, обычно, измеряется в эксперименте.

Для определения зависимости Δi от параметров системы был проведен вычислительный эксперимент. В нем измерялась зависимость среднеквадратичного отклонения тока дуги от $\omega\tau$ при различных значениях индуктивности цепи. Индуктивность изменялась от 0,1 до 1,0 мГн, что соответствует диапазону ее значений в схемах питания плазмотронов, предназначенных для обработки порошков и резки металлов [3]. Длительность последовательности импульсов пульсаций равнялась 30 импульсам. Каждую точку определяли как среднее по результатам двадцати независимых измерений с различными случайными последовательностями импульсов пульсаций напряжения.

Кривые на рисунке 3 получены аппроксимацией экспериментальных точек линейной комбинацией экспоненциальной и линейной функций.



1 – $L = 1,00$; 2 – $0,50$; 3 – $0,25$; 4 – $0,10$ мГн

Рисунок 3 – Зависимость среднеквадратичного отклонения тока Δi от $\omega\tau$ для различных значений индуктивности цепи

Диапазон изменения для каждой кривой ограничен снизу условием устойчивости системы по отношению к малым возмущениям:

$$L = RCR^* > 0, \quad (12)$$

где R^* – дифференциальное сопротивление дуги [3]. Определив значение ω , получим условие для $\omega\tau$:

$$\omega\tau \geq \frac{\tau}{L} \sqrt{RR^*}. \quad (13)$$

Для расчетов были взяты типичные значения $R = 1,0$ Ом и $R^* = 0,8$ Ом.

Из данных, представленных на рисунке 3, видно, что зависимость Δi от $\omega\tau$ во всех случаях имеет одинаковый характер – с увеличением значения $\omega\tau$ среднеквадратичное отклонение тока уменьшается и выходит примерно на постоянный уровень при фиксированном значении индуктивности.

Система находится в колебательном режиме при выполнении условия:

$$\omega\tau \leq 2\tau \frac{R}{L}. \quad (14)$$

В случае $L = 0,10, 0,25, 0,50$ и $1,00$ мГн это дает максимальные значения $\omega\tau$, равные соответственно 20, 8, 4 и 2. Как следует из рисунка 3, значения Δi уменьшаются с ростом $\omega\tau$ при колебательном режиме цепи и достигают своего минимума уже при аperiodическом режиме.

Увеличение значения ω приводит к возрастанию коэффициента затухания $\omega^2 L/2R$, уменьшению амплитуды отдельного импульса возмущения тока и увеличению его длительности. Последующие импульсы накладываются на предыдущие, что способствует увеличению среднего отклонения тока.

Увеличение среднеквадратичного отклонения при уменьшении индуктивности системы источник питания – дуга можно объяснить, исходя из структуры основного уравнения модели (7). Понижение индуктивности приводит к уменьшению коэффициента затухания, поэтому те же значения коэффициента, что и ранее, будут достигаться при больших значениях ω . При этом значительно возрастет правая часть уравнения (примерно пропорционально ω^2), что и приведет к увеличению возмущения тока дуги [5].

Висновки. Значення пульсацій току дуги в основному залежать від індуктивності системи джерела живлення – дуга. Збільшення індуктивності "сглажує" пульсації току дуги. Нижня границя значення індуктивності вказаної системи визначається індуктивними елементами схеми запуску дуги. Додатково збільшувати індуктивність складно через неминимізувану частоту при цьому активного опору схеми і порушення режиму роботи запуску дуги.

Для зменшення пульсацій току дуги при фіксованому значенні індуктивності значення ємкості повинні бути достатньо малими для виходу залежності

середньоквадратичного відхилення току Δi від $\omega\tau$ на пологий ділянку $\omega\tau = \tau/\sqrt{LC}$.

Кількісна оцінка впливу індуктивності на пульсації току і необхідні для оцінки ємкості значення $\omega\tau$ можна отримати з допомогою кривих на рисунку 3.

Зміна пульсації току дуги викликає коливання ентальпії, швидкості і температури плазмової струї (дуги) з частотами від декількох герц до кілогерц, що сприяє збільшенню коефіцієнта теплопередачі плазми і покращує нагрів порошку.

Бібліографічний список

1. Плазменная наплавка: [Текст] / А. Е. Вайнерман, М. Х. Шоршоров, В. Д. Веселко, В. С. Новосадов. – Л.: Машиностроение, 1969. – 192 с.
2. Лукашов В. П. Электродуговые плазмотроны промышленного назначения [Текст] / В. П. Лукашов, А. Н. Тимошевский // Плазмохимия-90, ч. 11. – М.: АН СССР. Ин-т нефтехим. синтеза, 1990. – С. 303 – 336.
3. Даутов Г. Ю. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами : [Текст] / Г. Ю. Даутов, В. Л. Дзюба, И. Н. Карп. – К.: Наук. думка, 1984. – 168 с.
4. Жуков М. Ф. Прикладная динамика термической плазмы : [Текст] / М. Ф. Жуков, А. С. Коротеев, Б. А. Урюков. – Новосибирск: Наука, 1975. – 298 с.
5. Петров С. В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности : [Текст] / С. В. Петров, А. Г. Саков. – К.: Топаз, 2000. – 220 с.

Рекомендована к печати к.т.н. Гальченко А. М.,
д.т.н., проф. ДДТУ Садовым А. В.

Статья поступила в редакцию 20.04.2018

к.т.н. Брожек Р. М., к.т.н. Руднев Є. С. (ДонДТУ, м. Лисичанськ, Україна)

ВПЛИВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ І РЕСУРСНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ - ПЛАЗМОТРОН НА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЙОГО РОБОТИ

Розглянута інженерна методика розрахунку параметрів системи джерело живлення - плазмотрон, що дозволяє підвищити стійкість системи джерело живлення-плазмотрон за рахунок зменшення величини збурення струму дуги при випадкових малих змінах напруги джерела живлення. Наведено теоретичне дослідження характеристик плазмотрона при впливі на стовп дуги збурюючої змінної напруги, отримані при цьому аналітичні залежності можуть бути використані при проектуванні плазмотронів для напилення, наплавлення і різання

Ключові слова: плазмовий струмінь, пульсації, електрод, розподіл струму дуги, амплітуда імпульсів.

PhD (Engineering) Brozhko R. N., PhD (Engineering) Rudniev Ye. S.
(DonSTU, Lisichansk, Ukraine)

INFLUENCE OF ENERGY AND RESOURCE PARAMETERS OF THE POWER SUPPLY SYSTEM PLASMA TORCH ON INCREASING THE EFFICIENCY OF ITS OPERATION

The engineering method for calculating the parameters of the power supply system-the plasma torch-is considered, which makes it possible to increase the stability of the power supply system-plasmatron by reducing the magnitude of the disturbance of the arc current for random small changes in the voltage of the power source. A theoretical investigation of the characteristics of a plasmatron under the influence of a disturbing alternating voltage on a column of arc is given, the analytical dependences obtained in this way can be used in the design of plasma torches for deposition, surfacing and cutting.

Key words: *plasma jet, pulsation, electrode, arc current distribution, pulse amplitude.*