

УДК 681.513.2

Н.В. Смирнова, канд. техн. наук, В.В. Смирнов, доц., канд. техн. наук
 Кировоградский национальный технический университет

Определение параметров вольт-амперной характеристики дуги при изменении величины межэлектродного промежутка

Приводится описание определения параметров вольт-амперной характеристики дуги при перемещении электрода-инструмента в процессе размерной обработки деталей электрической дугой. Параметры определяются путем проведения измерений и вычисления экстремума выборочного коэффициента взаимной корреляции между током и напряжением дуги в межэлектродном промежутке
вольт-амперная характеристика, рабочая точка, коэффициент нелинейности, электрическая дуга

Размерная обработка дугой (РОД) является процессом, основанным на использовании электрической дуги, в котором обработка деталей осуществляется в поперечном потоке жидкости – диэлектрика [1].

Стабильность рабочего тока дуги является одним из основных показателей качества обработки, поскольку превышение величины заданного тока приводит к увеличению диаметра эрозионных лунок, что снижает класс чистоты обработки детали. Стабильность тока дуги может быть обеспечена постоянством величины межэлектродного промежутка (МЭП) при условии, что рабочая точка дуги находится в середине динамической вольт-амперной характеристики (ВАХ) дуги.

Анализ исследований и публикаций. Исследования ученых института Патона показали, что условие устойчивого горения дуги выполняется, если в течение длительного времени дуговой разряд существует непрерывно при заданных значениях тока I_d и напряжения дуги U_d [2]. Установившийся режим работы системы электрическая дуга - источник питания дуги определяется точкой пересечения внешней ВАХ источника питания дуги и ВАХ дуги. Дуга будет гореть устойчиво в той точке, для которой разность производных функций характеристики дуги и источника питания будет положительной. Коэффициент устойчивости k_y определяется выражением:

$$k_y = \left(\frac{dU_d}{dI_d} - \frac{dU_{un}}{dI_{un}} \right) > 0. \quad (1)$$

В работе [2] сделан вывод, что для выполнения условия устойчивого горения дуги необходимо, чтобы внешняя характеристика источника питания дуги в рабочей точке имела большую крутизну, чем статическая характеристика дуги. Однако, при перемещении электрода-инструмента происходит изменение тока дуги, вызванное изменением положения рабочей точки дуги на ее ВАХ.

Цель статьи. С целью обеспечения стабильности тока дуги в процессе РОД необходимо определить оптимальные параметры рабочей точки дуги на ее ВАХ и поддерживать их стабильность в процессе обработки. Для решения этой задачи необходимо определить параметры ВАХ дуги путем установления взаимозависимости между током I_d и напряжением дуги U_d при перемещении электрода-инструмента в

пределах рабочей области МЭП.

Основная часть. Определение параметров вольт-амперной характеристики дуги осуществлялось на основании измерений тока I_d и напряжения дуги U_d и выборочного коэффициента взаимной корреляции R в процессе перемещении электрода-инструмента от минимального значения (короткое замыкание) до максимального (обрыв дуги) следующим образом:

1. На станке РОД модели “Дуга-8М” с помощью цифрового запоминающего осциллографа “Rigol 1052E” были записаны осциллограммы сигналов тока и напряжения дуги в процессе обработки детали в режимах короткого замыкания, обработки детали, обрыва дуги.

2. На осциллограммах с помощью программы “Signal Explorer” [3] проводились измерения мгновенных значений сигналов тока I_d и напряжения дуги U_d . Были определены взаимные коэффициенты изменения значений тока I_d и напряжения дуги U_d , необходимые для построения характеристики дуги при изменении величины МЭП. Значение коэффициента нелинейности k_s определяется выражением:

$$k_s = \frac{k_u}{k_I}, \quad (2)$$

$$\text{где } k_U = \left| \frac{U\ddot{a}_{(t_1)}}{U\ddot{a}_{(t_2)}} \right|, \quad k_I = \left| \frac{I\ddot{a}_{(t_1)}}{I\ddot{a}_{(t_2)}} \right| - \text{отношение значений напряжения } U_d \text{ и тока дуги } I_d$$

измеренных в момент времени t_1 к значениям напряжения U_d и тока дуги I_d измеренных в момент времени t_2 .

Измерения значений сигналов тока I_d и напряжения дуги U_d , проводились в точке осциллограммы, соответствующей экстремуму выборочного коэффициента корреляции $R \rightarrow 1$ и в точках осциллограммы вблизи участков, соответствующих началу развития процесса обрыва дуги или короткого замыкания при $R \rightarrow 0$.

Выборочный коэффициент взаимной корреляции R между сигналами тока и напряжения дуги определялся в соответствии с выражением:

$$R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (i_k - \bar{i}) \cdot (u_k - \bar{u})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (i_k - \bar{i})^2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (u_k - \bar{u})^2}}, \quad (3)$$

В соответствии с выражением (2), изменение напряжения дуги U_d на величину ΔU приводит к пропорциональному изменению тока дуги на величину ΔI , то есть будет соблюдаться равенство: $k_u = k_I$ и $k_s = 1$. Отсюда следует, что всякое нарушение этой пропорциональной зависимости является нарушением линейности ВАХ дуги. То есть, неравенство: $k_s < 1$ соответствует области изгиба характеристики при минимальном токе дуги и началу развития процесса обрыва дуги, а неравенство: $k_s > 1$ соответствует области изгиба характеристики на участке, формируемом внешней ВАХ источника питания при максимальном токе дуги и началу развития процесса короткого замыкания.

Равенство $k_s = 1$ соответствует линейной части ВАХ в окрестностях рабочей точки дуги и экстремуму выборочного коэффициента корреляции R .

На рис. 1 и таблице 1 представлены результаты измерений тока I_{δ} и напряжения дуги U_{δ} , а также выборочного коэффициента R корреляции на временном интервале t_1-t_2 для определения коэффициента нелинейности характеристики дуги k_s в процессе развития обрыва дуги. Поскольку ток I_{δ} и напряжение дуги U_{δ} при падающей внешней ВАХ источника питания дуги имеют обратно-пропорциональную зависимость, то значение выборочного коэффициента R корреляции имеет отрицательный знак.

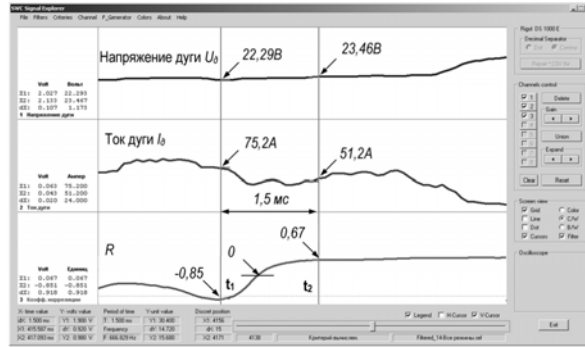


Рисунок 1 - Измерения I_{δ} , U_{δ} и R на временном интервале t_1-t_2 в процессе развития процесса обрыва дуги

Таблица 1 - Результаты измерений значений I_{δ} , U_{δ} и R на временном интервале t_1-t_2 в процессе развития обрыва дуги

№	Наименования измеряемого значения	Значение	Ед.изм.
1	Интервал измерения $t_2 - t_1$	1.5	мс
2	Значение R в момент времени t_1	-0.85	Ед.
3	Значение R в момент времени t_2	0.67	Ед.
4	Напряжение дуги U_{δ} в момент времени t_1	22.29	В
5	Напряжение дуги U_{δ} в момент времени t_2	23.46	В
6	Ток дуги I_{δ} в момент времени t_1	75.20	А
7	Ток дуги I_{δ} в момент времени t_2	51.20	А

Коэффициент нелинейности ВАХ дуги k_s составляет: $k_s = 0,64$, то есть $k_s < 1$. Значение коэффициента k_s , а так же значения тока I_{δ} и напряжения дуги U_{δ} свидетельствует о нарушении режима горения дуги и начале развития процесса обрыва дуги.

На рис. 2 и таблице 2 представлены результаты измерений I_{δ} , U_{δ} и R на временном интервале t_1-t_2 для определения коэффициента нелинейности характеристики дуги k_s в процессе развития короткого замыкания.

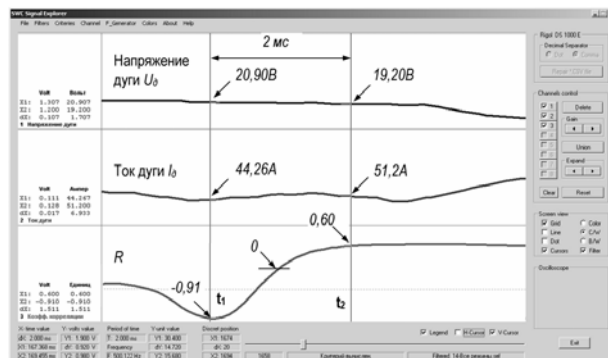


Рисунок 2 - Измерения I_{δ} , U_{δ} и R на временном интервале t_1-t_2 в процессе развития короткого замыкания

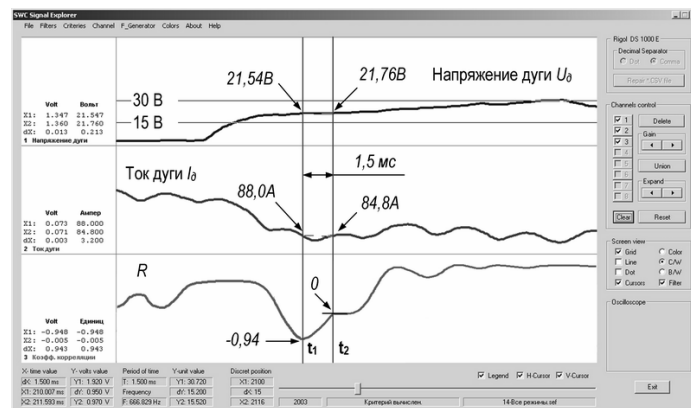
Таблиця 2 - Результаты измерений I_0 , U_0 и R на временном интервале t_1-t_2 в процессе развития короткого замыкания

№	Наименования измеряемого значения	Значение	Ед.изм.
1	Интервал измерения t_1-t_2	2	мс
2	Значение R в момент времени t_1	-0.91	Ед.
3	Значение R в момент времени t_2	0.60	Ед.
4	Напряжение дуги U_0 в момент времени t_1	20.90	В
5	Напряжение дуги U_0 в момент времени t_2	19.20	В
6	Ток дуги I_0 в момент времени t_1	44,26	А
7	Ток дуги I_0 в момент времени t_2	51.20	А

Коэффициент нелинейности характеристики дуги k_s составляет: $k_s = 1.25$ то есть $k_s > 1$. Значение коэффициента k_s , а так же значения тока I_0 и напряжения дуги U_0 соответствует изгибу характеристики дуги на участке, формируемом внешней ВАХ источника питания дуги и началу развития процесса обрыва дуги.

На рис. 3 и таблице 3 представлены результаты измерений I_0 , U_0 и R на временном интервале t_1-t_2 для определения закономерности изменения значения выборочного коэффициента взаимной корреляции R от величины МЭП.

Измерения осуществлялись на временном интервале t_1-t_2 на протяжении которого выборочный коэффициент корреляции R изменялся от экстремума до минимального значения. Область наблюдения ограничивалась минимальным значением напряжения горения дуги $U_{0_min} = 15В$, при уменьшении которого развивается процесс короткого замыкания и максимальным значением $U_{0_max} = 30В$, при увеличении которого развивается процесс обрыва дуги.

Рисунок 3 - Значения выборочного коэффициента корреляции R для двух независимых выборок тока I_0 и напряжения дуги U_0 Таблиця 3 - Значения выборочного коэффициента корреляции R для двух независимых выборок тока I_0 и напряжения дуги U_0

№	Наименования измеряемого значения	Значение	Ед.изм.
1	Интервал измерения t_1-t_2	1.5	мс
2	Значение R в момент времени t_1	-0.94	Ед.
3	Значение R в момент времени t_2	0	Ед.
4	Напряжение дуги U_0 в момент времени t_1	21.54	В
5	Напряжение дуги U_0 в момент времени t_2	21.76	В
6	Ток дуги I_0 в момент времени t_1	88.00	А
7	Ток дуги I_0 в момент времени t_2	84.80	А

Коэффициент нелинейности характеристики дуги k_s составляет $0.96 \approx 1$. В области наблюдения на интервале t_1-t_2 значение выборочного коэффициента корреляции изменялось от экстремума до минимального значения. При изменении значений тока I_d и напряжения дуги U_d отмечен линейный участок ВАХ дуги с коэффициентом $k_s \approx 1$. Из этого следует, что момент времени t_1 , при достижении экстремума выборочного коэффициента корреляции R рабочая точка дуги $U_{d_{pm}}$ находится в середине линейного участка динамической ВАХ дуги. В момент времени t_2 происходит уменьшение значения выборочного коэффициента корреляции до $R = 0$, что соответствует стабильному режиму горения дуги, неподвижному состоянию электрода-инструмента и отсутствию изменений величины МЭП.

На основании результатов измерений и установленных зависимостей (табл. 1-3) был построен график ВАХ дуги, которая формируется при изменении величины МЭП от минимального до максимального значения (50-250 мкм) при токе дуги $I_d = 100A$ с использованием электрода-инструмента из графита (рис. 4).

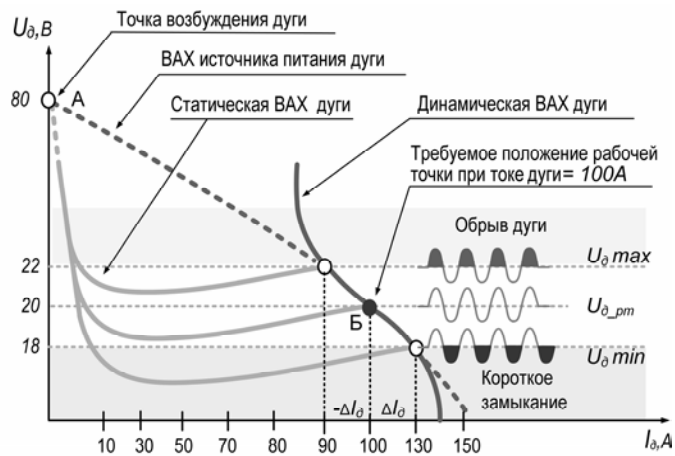


Рисунок 4 - Зависимость тока I_d и напряжения дуги U_d от величины МЭП

На графике (рис. 4) показано, что режиму обрыва дуги предшествует участок характеристики, в котором напряжение горения дуги U_d имеет максимально допустимое значение $U_{d_{max}}$, при увеличении которого происходит обрыв дуги.

Участку рабочего режима и оптимального положения рабочей точки дуги $U_{d_{pm}}$ соответствует участок характеристики, в котором напряжение горения дуги в рабочей точке $U_{d_{pm}}$ имеет номинальное значение.

Участку короткого замыкания дуги предшествует участок характеристики, в котором напряжение горения дуги в рабочей точке U_d имеет минимально допустимое значение $U_{d_{min}}$, при уменьшении которого происходит короткое замыкание.

Выводы. Установленные зависимости показали, что на формирование S-образной ВАХ дуги при изменении величины МЭП оказывают влияние два фактора:

1. С одной стороны изгиб характеристики обусловлен неустойчивым участком ВАХ при малых токах дуги.
2. С другой стороны изгиб характеристики обусловлен падающей ВАХ источника питания при больших токах дуги.

Таким образом, установлено, что ВАХ дуги имеет вид S-образной кривой при изменении МЭП от минимального до максимального значения при использовании источника питания с падающей внешней характеристикой, а сигналы тока I_d и напряжения дуги U_d связаны взаимной корреляционной зависимостью в окрестностях рабочей точки дуги.

Из этого следует, что для стабилизации тока дуги I_d в процессе РОД необходимо определить оптимальные параметры рабочей точки дуги по экстремуму выборочного коэффициента взаимной корреляции R между сигналами тока I_d и напряжения дуги U_d и поддерживать значение экстремума R в процессе обработки детали.

Список литературы

1. Носуленко В.И. Розмірна обробка металів електричною дугою. Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07 / Кировоградський гос. техн. ун-т – К., 1999.- 36 с.
2. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / [под ред. акад. Б. Е. Патона]. – М.: "Машиностроение", 1974. – 768 с.
3. Сидоренко В. В. Программная система для исследования сигналов и обработки данных вычислительных экспериментов / В. В. Сидоренко, Н. В. Смирнова, В. В. Смирнов // Матеріали 12 Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2010 ["Системний аналіз та інформаційні технології"], (Київ, 25-29 травня 2010 р.). – К.: УНК "ІПСА" НТУУ "КПІ", 2010. – С. 488.

Н. Смирнова, В. Смирнов

Визначення параметрів вольт-амперної характеристики дуги при зміні величини міжелектродного проміжку

Наводиться опис визначення параметрів вольт-амперної характеристики дуги при переміщенні електрода-інструмента в процесі розмірної обробки деталей електричною дугою. Параметри визначаються шляхом проведення курсорних вимірювань та обчислення екстремуму вибіркового коефіцієнта взаємної кореляції між струмом і напругою дуги в міжелектродному проміжку

N. Smirnova, V. Smirnov

The arc current-voltage characteristics parameters defining to the extent that the electrode gap

The parameters determining the arc current-voltage characteristics when the tool-electrode moving in the dimensional machining arc process description. The parameters are defined by means of cursor measurements the sample cross-correlation between current and voltage of the arc in the interelectrode gap extremal coefficient calculation.

Получено 30.03.12