

АДАПТИВНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

В.М. Нуждов

Рассмотрено устройство, обеспечивающее прерывание импульсов силового генератора электроэрозионного станка при возникновении разрядов с пониженным напряжением на межэлектродном промежутке. Особенностью устройства является использование следящей измерительной системы для настройки его порогового напряжения. На основе теории цепей Маркова рассчитаны вероятность нахождения порогового напряжения в заданной полосе значений и вероятность ложного отключения генератора импульсов в зависимости от шага квантования.

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) широко применяется в машиностроении для получения отверстий и фасонных полостей в заготовках из токопроводящих материалов. Условием стабильного и производительного процесса является равномерное распределение электрических разрядов по обрабатываемой поверхности. Однако при затрудненной эвакуации продуктов эрозии это условие обычно нарушается, и могут возникать «аномальные» дуговые разряды, приводящие к появлению шлаковых наростов на электродах. Поэтому защита от дуговых разрядов является одной из задач управления процессом ЭЭО [1].

Для решения этой задачи целесообразно использовать устройства для защиты от межэлектродных коротких замыканий (МКЗ), которые контролируют мгновенное значение напряжения на промежутке. При выборе порога срабатывания выше напряжения «аномального» разряда такое устройство позволяет прервать дуговой импульс в начальной стадии и, тем самым, снизить вероятность наростообразования. Но при этом возможны и ложные отключения генератора импульсов из-за случайного разброса напряжения на дуге разряда.

В [2] показано, что параметры устройства следует выбирать с учетом характеристик распределения МКЗ по длительности и ограничений по величине порогового напряжения срабатывания $U_{\text{пор}}$. Верхняя граница порогового напряжения соответствует напряжению на межэлектродном промежутке (МЭП) в конце разряда $u_{\text{с.к}}$, а его нижняя граница определяется напряжением дугового (аномального) импульса и временем задержки срабатывания $t_{\text{зс}}$. Средние значения этих напряжений зависят от длительности импульсов, свойств рабочей жидкости и материалов электродов [1]. Поэтому для хорошей работы устройства необходимо изменять величину $U_{\text{пор}}$ при изменении режима и условий обработки.

При малом числе варьируемых параметров такая задача может быть решена путем программного управления. Однако при широкой номенклатуре материалов и большом количестве режимов более удобным является задание порогового напряжения с помощью встроенного измерителя напряжения на дуге разряда.

На рис. 1 изображена функциональная схема системы автоподстройки порогового напряжения $U_{\text{пор}}$.

Питание межэлектродного промежутка МЭП осуществляется от генератора импульсов ГИ, в состав которого входят задающий генератор ЗГ, логический элемент И и транзисторные силовые блоки СБ. В системе используется быстродействующее устройство для защиты от коротких замыканий УЗК, на входы которого подаются задающие импульсы $x_{\text{ЗГ}}$ и напряжение МЭП $u_{\text{с}}(t)$ [3]. Порог срабатывания устройства задается с помощью следящей измерительной системы ИС, состоящей из компараторов К1, ... К3, логического устройства ЛУ, реверсивного счетчика РСч и цифро-аналогового преобразователя ЦАП:

$$U_{\text{пор}}(t) = k_{\text{с}} \cdot U_2(t), k_{\text{с}} < 1, \quad (1)$$

где $U_2(t)$ - выходное напряжение ЦАП; $k_{\text{с}}$ - коэффициент связи.

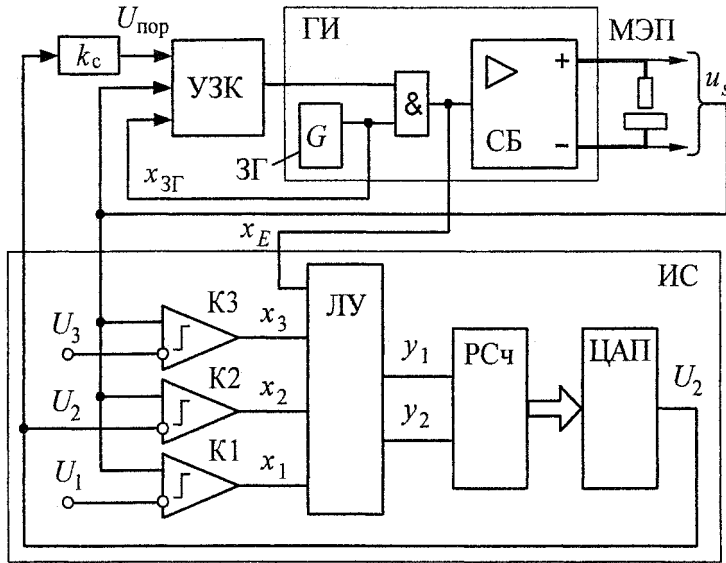


Рис. 1. Функциональная схема системы автоподстройки

Логические сигналы на выходах компараторов $x_i=1$ ($i=1, \dots, 3$) возникают при $u_s(t) > U_i$, причем $U_1 > U_2 > U_3$. С помощью напряжений U_1 и U_3 задаются границы настройки и выявляются импульсы холостого хода и короткого замыкания, которые не должны создавать счетных импульсов для РСч.

Формирование импульсов сложения y_1 или вычитания y_2 на выходах ЛУ (рис. 2) происходит в моменты окончания импульса ЭДС генератора $x_E = x_{3Г} \cdot x_{УЗК}$ и описывается функциями

$$y_1 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot dx_E; \quad y_2 = x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot dx_E,$$

где $x_{УЗК}$ – выходной сигнал УЗК; dx_E – импульсный сигнал, соответствующий заднему фронту импульса x_E .

Такая логика обеспечивает контроль напряжения на МЭП в конце разряда и его использование в качестве задающего воздействия для контура настройки напряжения $U_{пор}$.

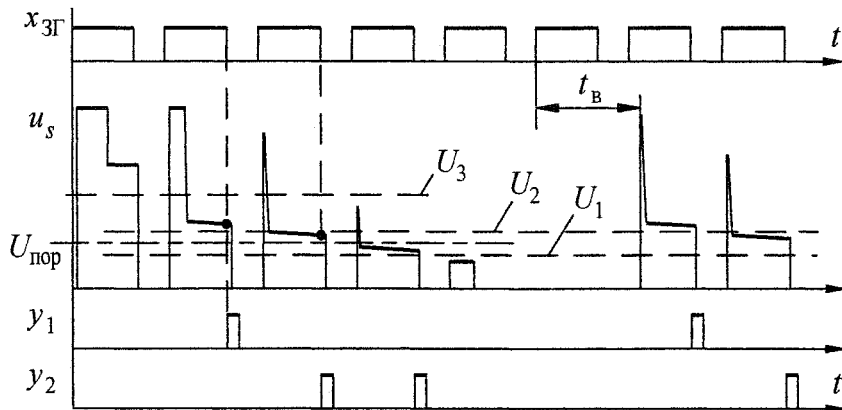


Рис. 2. Диаграмма работы логического устройства

Рассмотрим работу следящей системы с учетом влияния УЗК. Обозначим через $\tilde{u}_{с.к}$ случайную величину – напряжение на МЭП в конце импульса, $\tilde{u}_2(t)$ – случайный процесс на выходе ЦАП, $f(u)$ – плотность вероятности величины $\tilde{u}_{с.к}$ для всех импульсов, включая холостые и импульсы короткого замыкания. Точками $u=U_1$ и $u=U_3$ возможные значения напряжения делятся на три интервала, которым соответствуют участки кривой распределения f_1, f_2 , и f_3 , (рис. 3).

Вероятности попадания величины $\tilde{u}_{с.к}$ в эти интервалы обозначим через λ_1 , λ_2 , и λ_3 , причем $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$. Вероятность пробоя МЭП

$$l = P(\tilde{u}_{с.к} < U_3) = \lambda_1 + \lambda_2. \tag{2}$$

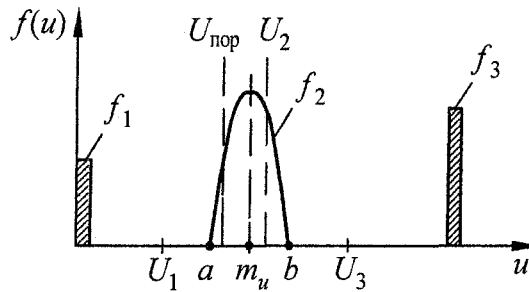


Рис. 3. Плотность распределения напряжения импульсов

Предположим, что на интервале $[a, b]$, соответствующем разрядам, плотность вероятности может быть описана уравнением параболы в виде

$$f_2(u) = \frac{3\lambda_2}{4\delta} \cdot \left[1 - \frac{(u - m_u)^2}{\delta^2} \right] = \frac{3\lambda_2}{4\delta} \cdot [1 - v^2], \tag{3}$$

где $m_u = (a + b)/2$ – математическое ожидание контролируемого напряжения для разрядов; $\delta = m_u - a = (b - a)/2$, $v = (u - m_u)/\delta$.

интегральная функция распределения величины $\tilde{u}_{с.к}$ в интервале $[U_1, U_3]$ будет иметь вид:

$$F(u) = \begin{cases} \lambda_1, & \text{при } U_1 \leq u \leq a; \\ \lambda_1 + (\lambda_2/4) \cdot [3v - v^3 + 2], & \text{при } a \leq u \leq b; \\ \lambda_1 + \lambda_2, & \text{при } b \leq u \leq U_3. \end{cases} \tag{4}$$

Поскольку выходное напряжение ЦАП изменяется дискретно, а вероятности появления сигналов y_1, y_2 , определяющие направление счета, зависят от его текущего значения, случайный процесс $\tilde{u}_2(t)$ представляет собой Марковскую цепь с матрицей переходных вероятностей $[P_{ij}]$. Число состояний этой цепи $(k+1)$ равно числу возможных значений напряжения.

Определим характеристики стационарного случайного процесса, предполагая, что при выбранном шаге квантования h напряжение не выходит за пределы интервала $[a, b]$. В этом случае наибольший номер состояния Марковской цепи равен $k = (b - a)/h$, и некоторому состоянию S_i можно поставить в соответствие уровень напряжения

$$U_{2i} = a + h \cdot i, \quad i = \overline{0, k}. \tag{5}$$

Согласно рис. 3 и уравнениям ЛУ при $x_{узк} = 1$ импульсы на входе сложения РСч возникают с вероятностью $p_i = \lambda - F(U_{2i})$, а на входе вычитания - с вероятностью $q_i = F(U_{2i}) - \lambda_1$. Вероятность отсутствия этих двух импульсов и сохранения состояния S_i равна $r = 1 - l + \lambda_1 = 1 - \lambda_2$. Следовательно, элементы матрицы перехода могут быть описаны общей формулой:

$$P_{ij} = \begin{cases} q_i, & \text{если } j = i - 1; \\ r, & \text{если } j = i; \\ p_i, & \text{если } j = i + 1; \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \tag{6}$$

Как известно, такая матрица соответствует процессу одномерного случайного блуждания [4, 5]. Финальные вероятности $\{P_i\}$, $i = \overline{0, k}$ состояний процесса вычисляются путем последовательного решения уравнений вида

$$P_i = p_{i-1}P_{i-1} + rP_i + q_{i+1}P_{i+1},$$

которые дополняются условием $p_0 = 1 - r$ и условием нормировки $\sum P_i = 1$. В результате получаем:

$$P_0^{-1} = 1 + \sum_{i=1}^k \prod_{k=0}^{i-1} \frac{p_k}{q_{k+1}}; P_i = P_0 \cdot \prod_{k=0}^{i-1} \frac{p_k}{q_{k+1}}, i = \overline{1, k}. \quad (7)$$

Заметим, что отношение p_k/q_{k+1} и, соответственно, финальные вероятности не зависят от величин l и λ_1 .

С помощью финальных вероятностей можно оценить точность настройки порогового напряжения. Для этого найдем вероятность нахождения величины $\tilde{u}_2(t)$ в заданной полосе значений $(m_u \pm nh)$.

$$P(nh) = P \left[\tilde{u}_2(t) - m_u \leq nh \right], n = 0, 1, \dots$$

Возьмем нечетное число состояний $(k+1)$, при котором средний уровень напряжения U_{2l} , $l = k/2$ совпадает с математическим ожиданием напряжения разрядов m_u . Тогда получим:

$$P(nh) = \sum_{i=l-n}^{l+n} P_i, n = 0, 1, \dots \quad (8)$$

В табл. 1 приведены значения этой вероятности, рассчитанные по формулам (3)...(8) при $a=24$ В, $m_u=25$ В для двух значений шага квантования: $h=0,1$ В и $h=0,05$ В. Как видим, при шаге $h=0,05$ В напряжение $\tilde{u}_2(t)$ не выходит за пределы $25 \pm 0,5$ В с вероятностью 0,99997.

Таблица 1

Вероятность нахождения напряжения ЦАП в интервале $m_u \pm nh$

Отклонение nh , В	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Вероятность $P(n \cdot 0,1)$	0,213	0,582	0,825	0,944	0,987	0,998
Вероятность $P(n \cdot 0,05)$	0,152	0,664	0,918	0,9885	0,99914	0,99997

Следует отметить, что ввиду случайных изменений напряжения разряда возможны ложные отключения ГИ при нормальном импульсе напряжения. Вероятность такого события определяется соотношением

$$p_{л} = P \left[a \leq \tilde{u}_{s,k} \leq k_c \cdot \tilde{u}_2(t) \right].$$

Так как это событие может происходить при разных значениях порогового напряжения $U_{пор,i} = k_c U_{2,i}$, для нахождения величины $p_{л}$ воспользуемся формулой полной вероятности. Получим:

$$p_{л} = \sum_{i=1}^k P_i \cdot F(U_{пор,i}) - \lambda_1. \quad (9)$$

Расчетные значения вероятности $p_{л}$ приведены в табл. 2 для $a=24$ В, $m_u=25$ В, $\lambda = 1$, $\lambda_1 = 0$.

Полученные результаты показывают, что снижение шага квантования h и коэффициента k_c приводит к уменьшению вероятности ложного отключения генератора.

Для выбора этих параметров зададимся допустимой долей потерь рабочего времени $\Delta \bar{t}_{раб}$, временем восстановления импульсов после МКЗ t_v (рис. 2) и частотой задающего генератора $f_{зг}$

[2]. По этим параметрам найдем среднюю частоту срабатывания УЗК $f_k = \Delta t_{\text{раб}} / t_b$. Очевидно, что должно выполняться условие $p_n < f_k / f_{3Г}$. Например, при $f_k = 0,1$ Гц и $f_{3Г} = 100$ кГц получаем $p_n < 1 \cdot 10^{-6}$, что в табл. 2 соответствует коэффициенту $k_c = 0,94$ при шаге квантования $h = 0,05$ В.

Таблица 2

Вероятность ложного отключения генератора

Шаг квантования h , В	0,05			0,1		
Коэффициент k_c	0,94	0,95	0,96	0,94	0,95	0,96
Вероятность p_n	$1 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$

В реальных условиях обработки наблюдается последствие разрядов, и напряжение на МЭП изменяется не так быстро, как при абсолютно случайном процессе. Вследствие этого интервал распределения $[a, b]$ на небольшом отрезке времени может оказаться более узким по сравнению с принятым в расчете (2 В). При этом математическое ожидание m_u изменяется при изменении межэлектродного зазора и загрязненности рабочей среды.

Время выхода следящей измерительной системы на установившийся режим (время настройки) зависит от начального значения напряжения ЦАП $U_{2\text{нач}}$, частоты импульсов $f_{3Г}$, шага квантования h и вероятности возникновения разрядов λ :

$$t_n \geq \frac{|m_u - U_{2\text{нач}}|}{h \cdot f_{3Г} \cdot \lambda}.$$

Например, при $|m_u - U_{2\text{нач}}| = 2$ В, $f_{3Г} = 1000$ Гц, $h = 0,05$ В и $\lambda = 1$ получаем $t_n \approx 40 / f_{3Г} = 0,04$ с (при отсутствии срабатываний УЗК).

Моделирование работы системы с помощью программы *VisSim* показало, что предлагаемый способ автоматической настройки УЗК с помощью следящей измерительной системы работоспособен и при достаточно малом шаге квантования позволяет поддерживать стабильное значение порогового напряжения.

Экспериментальная проверка предлагаемого устройства производилась при прошивке квадратного отверстия площадью 1 см^2 графитовым электродом-инструментом в стальной заготовке. Обработка велась прямоугольными импульсами с частотой 1 кГц, скважностью 1,2 и амплитудой тока 60 А при $U_{\text{пор}} = 23,5 \dots 25$ В, шаге квантования $h = 0,05$ В и времени задержки срабатывания $t_{з,с} = 200$ мкс. Для очистки МЭП применялась автоматическая релаксация (периодический отвод) электрода-инструмента. В результате глубина обработки 10 мм была достигнута за 20 мин, а глубина 20 мм - за 60 мин.

Таким образом, применение автоматической настройки порогового напряжения и малого времени задержки срабатывания защиты позволяет снизить вероятность наростообразования в МЭП.

Литература

1. Иоффе В.Ф., Коренблюм М.В., Шавырин В.А. Автоматизированные электроэрозионные станки. -Л.: Машиностроение, 1984. -227с.
2. Нуждов В.М. Выбор параметров устройства для защиты от коротких замыканий при электроэрозионной обработке // Автоматизация расчета и контроля параметров изделий в машиностроении: сб. науч. тр. - Челябинск: ЧГТУ, 1995. - С. 78-83.
3. Авт. свид. № 778987 СССР, МКИ В23Н1/02. Устройство для защиты от коротких замыканий при электроэрозионной обработке /В.М. Нуждов. - Оpubл. 15.11.80, Бюлл. № 42.
4. Тихонов В.К, Миронов М.А. Марковские процессы. - М.: Советское радио, 1977. - 488 с.
5. Карлин С. Основы теории случайных процессов. -М.: Мир, 1971. - 536 с.