

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Институт импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43-а, г. Николаев, 54018, Украина*

Известно, что электрогидроимпульсная обработка (ЭГИО) является универсальным и эффективным методом повышения служебных характеристик металлоконструкций с технологическими напряжениями [1], сущность, которой заключается в обработке напряженных участков конструкций многократными импульсами давления, генерируемыми высоковольтными электрическими разрядами в воде. При этом снижение напряжений I и II родов и стабилизация дислокационной структуры происходят одновременно вследствие активации дислокационно-сдвиговых релаксационных процессов в результате многократного прохождения через обрабатываемый металл упругих волн напряжений.

Вопрос об эффективности преобразования энергии при подводном искровом разряде возникает в связи с необходимостью выбора такого оптимального режима разряда в LC -цепи, при котором обеспечивается максимум механического действия [2]. Мерой такого воздействия при всем многообразии электровзрывных технологических процессов могут служить параметры ударной волны. Большинство исследований [3 – 5] показывают, что высокая эффективность разряда наблюдается тогда, когда он протекает в режиме, близком к критическому. Для критического разряда вся энергия, запасенная в конденсаторной батарее, выделяется в течение одной положительной полуволны тока разряда; сопротивление канала в течение всего периода разряда оказывается выше активного сопротивления элементов разрядного контура, а потерями энергии в них можно пренебречь.

Согласно [2] наиболее быстрая передача энергии накопителя в канал разряда и наибольший электроакустический КПД для разряда, близкого к критическому, обеспечивается при условии энергетической оптимальности, определяющейся связью между параметрами разрядного контура и рабочего промежутка при использовании воды-конденсата, удельная электропроводность которой $\lambda \sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Однако применительно к ЭГИО сварных металлоконструкций в производственных условиях не всегда возможно соблюдение условий энергетической оптимальности разряда. Обусловлено это прежде всего применением в промышленных условиях рабочих жидкостей, обладающих электропроводностью λ в диапазоне $(2 - 10) \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, как, например, техническая вода. С повышением удельной электропроводности эффективность электрического разряда в воде снижается в результате предпробивных потерь энергии [6]. Предельное значение электропроводности, при котором снижением напряжения заряда U_0 конденсаторной батареи за счет предпробивных потерь можно пренебречь, равно $\lambda = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Для электропроводностей выше предельного значения потерь энергии будут увеличиваться: чем выше электропроводность, тем больше потери энергии.

Нестабильность стадии формирования разряда существенно снижает возможность управления технологическим процессом ЭГИО, поскольку реальное напряжение в момент пробоя оказывается ниже зарядного, а это значительно влияет на режим разряда. При этом КПД преобразования энергии уменьшается, что приводит к снижению эффективности электрогидроимпульсной обработки сварных соединений. Поэтому возникает необходимость учета отклонений КПД преобразования энергии единичных разрядов с целью последующей корректировки режима ЭГИО.

Поскольку КПД преобразования энергии является функцией многих независимых переменных (электропроводности воды, разрядного промежутка, емкости и индуктивности) экспериментальные исследования по определению зависимости КПД от вышеперечисленных факторов проводились с применением математического планирования.

Для нахождения зависимости $\eta = f(C, \lambda, L, l_{\text{пр}})$ предполагали априори, что она имеет вид полинома первой степени.

Пределы, в которых изменялись независимые переменные, установлены с учетом опыта промышленного применения ЭГИО:

- электропроводность воды от 10^{-3} до 10^{-1} Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$;
- индуктивность разрядного контура от 7 до 30 мкГн;
- длина разрядного промежутка от 30 до 100 мм;
- емкость батареи конденсаторов от 3 до 9 мкФ.

В этих пределах выбирали для каждого фактора основной уровень и интервал варьирования (см. табл.1). В связи с тем, что факторы различны по физической природе и изменяются в разных динамических диапазонах, для формализации процесса анализа и независимости полученных результатов от изменения масштаба входных величин независимые переменные предварительно кодировались. Связь между кодированным и натуральным значениями определялась из соотношения [7]

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{J_i}, \quad (1)$$

где X_i – натуральное значение i -го фактора; X_{i0} – натуральное значение i -го фактора на нулевом уровне; J_i – интервал варьирования.

Пределы изменения независимых переменных, их кодовые значения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Независимые переменные, их кодовые значения и интервал варьирования

Интервал варьирования и уровень факторов	Емкость батареи конденсаторов, $C, 10^{-6}, \Phi$	Индуктивность разрядного контура, $L, 10^{-6}, \text{Гн}$	Длина разрядного промежутка, $l_p, 10^{-3}, \text{м}$	Удельная электропроводность, $\lambda, \text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$
Нулевой уровень $x_i = 0$	6	21,3	65	$4,1 \cdot 10^{-2}$
Интервал варьирования J_i	3	7	35	$4,0 \cdot 10^{-2}$
Нижний уровень $x_i = -1$	3	14,3	30	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Верхний уровень $x_i = +1$	9	28,3	100	$8,0 \cdot 10^{-2}$
Кодовое значение	x_1	x_2	x_3	x_4

Условия проведения экспериментов записывались в виде матрицы планирования, приведенной в табл. 2. Основным преимуществом такого ортогонального плана первого порядка является раздельная (независимая) оценка коэффициентов регрессии.

Таблица 2. Расширенная матрица планирования экспериментов

n_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	\bar{y}_i	$S^2_{\{y_i\}}$	η_i
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	0,41	0,02	0,42
2	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	0,34	0,02	0,37
3	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	0,37	0,08	0,39
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	0,31	0,08	0,33
5	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	0,82	0,18	0,79
6	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	0,76	0,05	0,76
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	0,78	0,18	0,71
8	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	0,68	0,18	0,69
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	0,37	0,18	0,38
10	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	0,33	0,18	0,35
11	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	0,31	0,02	0,30
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	0,29	0,18	0,32
13	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	0,67	0,18	0,69
14	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	0,49	0,32	0,53
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	0,60	0,08	0,58
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,45	0,02	0,43
B_i	0,55	-0,02	-0,03	0,175	-0,06	0,001	-0,007	0,034	-0,01	0,003	-0,045		

Моделирование электрического разряда в жидкости производилось на экспериментальной установке. Разряд осуществлялся в специальной разрядной камере объемом $0,12 \text{ м}^3$, заполненной водопроводной или дистиллированной водой. При исследовании электрических характеристик разряда использовалась система электродов острие – плоскость, диаметр острия составлял 8 мм. Для увеличения ин-

дуктивности разрядного контура использовалась катушка. Методика исследований предусматривала одновременное осциллографирование разрядного тока и напряжения с помощью двухлучевого осциллографа С8-17 по схеме, приведенной на рис. Для измерения разрядного тока $I(t)$ применялся магнитный потенциалметр (катушка Роговского), позволяющий получать точность измерения порядка 5%; для регистрации напряжения $U(t)$ использовался емкостной делитель напряжения, присоединенный к выходу исследуемого разрядного промежутка [8]. Компенсация индуктивной составляющей падения напряжения на электродной системе производилась последовательным включением в цепь делителя напряжения тороидального воздушного трансформатора равной взаимоиндукции [9]. По осциллограммам разрядного тока и напряжения рассчитывались мощность разряда, энергия, выделившаяся в канале разряда за первый полупериод, и КПД преобразования энергии [2]. Точность электрических измерений и вычислений контролировалась по балансу энергии. Как правило, разбаланс не превышал 10%, что и принималось за верхнюю границу точности электрических измерений. Вышеуказанные характеристики находились методом графического или численного расчетов.

Результаты экспериментов обрабатывали с использованием методов математической статистики [10]. Для каждой точки факторного пространства вычисляли среднее значение выходной величины \bar{y}_i и ее построчную дисперсию $S^2\{y_j\}$ (см. табл. 2). Воспроизводимость эксперимента проверялась по критерию Кохрена [7].

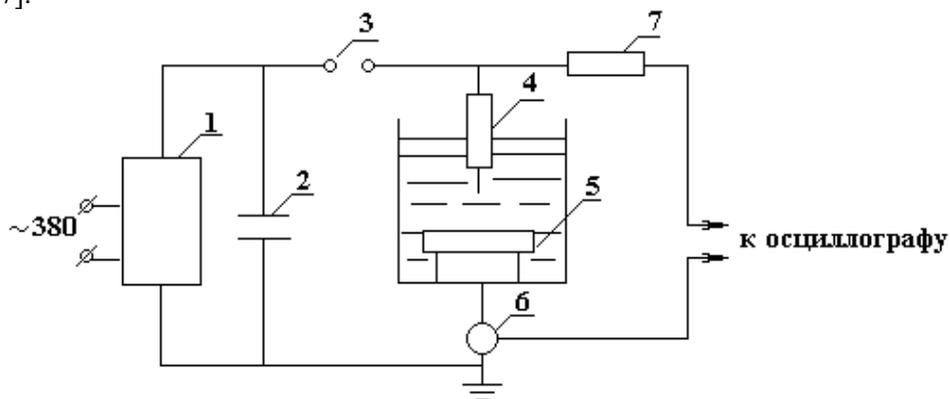


Рис. Схема измерения импульсных токов и напряжений:
1 – ВТМ-15/50; 2 – батарея конденсаторов; 3 – разрядник; 4 – электрод;
5 – образец; 6 – катушка Роговского; 7 – делитель напряжения

После обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа с последовательным исключением незначимых коэффициентов получено уравнение регрессии в виде полинома первой степени, которое в кодированной системе имеет вид

$$\begin{aligned}
 Y &= B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_3 + B_4x_4 + B_{12}x_1x_2 + B_{13}x_1x_3 + B_{14}x_1x_4 + B_{23}x_2x_3 + B_{24}x_2x_4 + B_{34}x_3x_4 = \\
 &= 0,551 - 0,02x_1 - 0,03x_2 + 0,175x_3 - 0,06x_4 + 0,001x_1x_2 + 0,007x_1x_3 + 0,034x_1x_4 - \\
 &- 0,01x_2x_3 + 0,03x_2x_4 - 0,045x_3x_4.
 \end{aligned} \tag{2}$$

После перевода в естественную систему координат окончательно получаем уравнение регрессии

$$\begin{aligned}
 \eta &= 0,337 - 1,28 \cdot 10^4 C - 1,96 \cdot 10^3 L + 5,59 l_p - 0,54\lambda + 4,76 \cdot 10^7 C \cdot L + 6,67 \cdot 10^4 C \cdot l_p + \\
 &+ 1,73 \cdot 10^5 C \cdot \lambda - 4,08 \cdot 10^4 L \cdot l_p + 4,28 \cdot 10^3 L \cdot \lambda - 12,86 l_p \cdot \lambda.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Полученное уравнение регрессии проверяли на адекватность экспериментальным данным по критерию Фишера [11]. Такая проверка необходима, поскольку вид зависимости заранее был неизвестен и выбирался по возможности простым. Проверка показала, что полученное в результате экспериментов аналитическое выражение $\eta = f(\lambda, L, C, l_p)$ с достоверностью 95% адекватно экспериментальным данным. Следовательно, полученное уравнение регрессии можно использовать в качестве интерполяционной модели.

Анализ регрессионной зависимости показал, что все независимые переменные оказывают влияние на величину η , но степень их влияния различна.

Например, при изменении индуктивности разрядного контура в диапазоне от 10 до 30 мГн, то есть в три раза, величина η при всех прочих равных условиях изменяется на 10%. Наиболее существенное влияние на режим разряда и КПД преобразования энергии оказывает длина разрядного промежутка, при увеличении последней величина η монотонно возрастает. Поэтому для ЭГИО в промышленных условиях длина разрядного промежутка выбирается в диапазоне (80 – 100) мм.

Полученная зависимость позволяет также оценить снижение КПД в результате потерь энергии в проводящей воде, при этом для электропроводностей выше $5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ потери энергии значительны, что необходимо учитывать при выборе режимов ЭГИО.

Поэтому для обеспечения эффективной ЭГИО в проводящей воде потери энергии должны быть компенсированы соответствующим увеличением запасаемой энергии единичных разрядов, что реализуется введением поправочного коэффициента κ_η , который определяется из соотношения

$$\kappa_\eta = \frac{\eta_\varepsilon}{\eta_p}, \quad (4)$$

где η_ε – величина КПД преобразования энергии при условиях, близких к оптимальным ($\eta_\varepsilon = 0,75$); η_p – величина КПД преобразования энергии, определенная по регрессионной зависимости для производственных условий.

Тогда рабочее значение энергии единичного разряда для промышленных условий определяется соотношением

$$W_p^H = \kappa_\eta \cdot W_p, \quad (5)$$

где W_p – рабочее значение энергии единичного разряда при оптимальных условиях, кДж,

$$W_p = \frac{C \cdot U_0^2}{2}. \quad (6)$$

Таким образом, на основе результатов экспериментальных исследований изменения КПД преобразования энергии в зависимости от условий формирования электрических разрядов получено уравнение регрессии $\eta = f(\lambda, C, L, l_p)$, которое можно использовать в качестве интерполяционной модели для определения величины η при изменении каждого из независимых параметров.

Для обеспечения высокой эффективности ЭГИО сварных конструкций в проводящей воде предложена корректировка расчетов режимов обработки введением поправочного коэффициента κ_η .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Опара В.С., Резникова Л.Я., Онацкая Н.А., Демиденко Л.Ю.* Электрогидроимпульсная обработка – универсальный и эффективный метод повышения служебных характеристик металлоконструкций с технологическими напряжениями // Тяжелое машиностроение. 1998. № 10. С. 7 – 9.
2. *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев, 1986.
3. *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. М., 1971.
4. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Под ред. Г.А. Гулого. М., 1977.
5. *Окунь И.З.* Исследование электрических характеристик импульсного разряда в жидкости // Журн. техн. физики. 1971. Т. 39. Вып. 5. С. 292 – 301.
6. *Кривицкий Е.В., Шамко В.В.* Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев, 1979.
7. *Володарский Е.Т., Малиновский Б.Н., Туз Ю.М.* Планирование и организация измерительного эксперимента. Киев, 1987.
8. *Шваб А.* Измерения на высоком напряжении (Измерительные приборы и способы измерения) / Пер. с нем. М., 1973.
9. *Остроумов Г.А., Штейнберг А.А.* Способ измерения импульсных напряжений // Приборы и техника эксперимента. 1963. № 3. С. 85 – 89.
10. *Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И.* Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М., 1978.
11. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., 1976.

Поступила 15.05.03

Summary

The methods of experimental planning and regression analysis are used to obtain the dependence of relative efficiency as the function of discharging circuit, discharge gap's length and water electronic conductivity parameters. It is shown that the regression equation may be used as interpolation model to compute the relative efficiency with changing of each of independent variables. To increase energy-conversion efficiency of electrohydraulic pulse treatment for welded constructions in conducting water the corrected from of calculation including correction coefficient is proposed.