

# Энергетические параметры процесса электроискровой обработки металлических поверхностей: методика определения параметров (на примере установки «БИГ-1»)

В. И. Иванов

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Всероссийский научно-исследовательский технологический институт  
ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка» (ФГБНУ ГОСНИТИ),  
1-й Институтский проезд, д. 1, г. Москва, 109428, Россия, e-mail: [tehnoinvest-vip@mail.ru](mailto:tehnoinvest-vip@mail.ru)*

Описана новая методика определения энергетических параметров процесса электроискровой обработки металлических поверхностей, включающая определение трех групп параметров, характеризующих: электрический режим по энергетическим картинкам; параметры единичных импульсов; энергетическую эффективность процесса ЭИО. Методика предназначена для использования в исследовательских целях, при создании нового оборудования, отработки технологии ЭИО ответственных деталей, диагностирования процесса обработки ответственных деталей и оборудования при длительной эксплуатации.

*Ключевые слова: электроискровая обработка, электрический режим, энергетические параметры, энергетическая картина, искровой импульс, энергия импульсов, импульсный ток, энергетическая эффективность.*

УДК 621.9.048

## ВВЕДЕНИЕ

Современные машиностроительное и ремонтное производства неразрывно связаны с применением упрочняющих и восстанавливающих технологий [1, 2], реализуемых механическими, газопламенными, электрофизическими, электрохимическими и другими методами. В ряду электрофизических методов определенное место занимает электроискровая обработка металлических поверхностей в газовой среде (ЭИО). Этот обладающий высокой эффективностью и универсальностью метод разработан советскими учеными Б.Р. и Н.И. Лазаренко [3, 4] и более 70 лет успешно применяется при упрочнении металлических поверхностей, восстановлении размеров изношенных деталей и нанесении металлических покрытий со специальными свойствами [5–8].

Метод ЭИО основан на многократном воздействии короткими электрическими импульсами на металлическую поверхность, в процессе которого осуществляется перенос элементов материала электрода (анода) на изделие (катод) и формируются на последнем рельеф поверхности и поверхностный слой с измененными характеристиками [5–8]. Рабочим инструментом при этом является электрическая искра, от параметров которой и совокупного воздействия их множества зависят изменения на поверхности изделия (деталь, инструмент) и эффективность процесса ЭИО.

При высокой универсальности и эффективности ЭИО и наличии большого количества моде-

лей электроискровых (ЭИ) установок, производимых для решения широкого круга производственных задач многими технически развитыми странами [9], в технической литературе отсутствуют систематизированные данные по исследованию энергетических параметров электрических режимов этих установок и отдельных импульсов. Имеющаяся современная информация [10–13 и др.] носит частный характер, отсутствует единая методология выполнения исследований. В публикациях приводятся результаты изучения физики процесса, эрозии электродных материалов, явлений в поверхностных слоях металлов при ЭИО, механических и физико-химических свойств металлических поверхностей после ЭИО. При этом анализ и обобщение данных обычно построены на использовании разных определяющих режим обработки энергетических параметров, в частности таких, как напряжение, ток, емкость, частота вибрации и частота импульсов, импульсный ток, но отсутствуют данные по энергии единичных импульсов, суммарной энергии искрового процесса в единицу времени; нет критериев оценки стабильности ЭИ процесса. Поэтому полезность опубликованных сведений имеет ограниченный характер, они недостаточны для создания новых генераторов и электродов-инструментов с оптимальными характеристиками, для разработки новых технологий ЭИО ответственных деталей, для организации тестирования ЭИ оборудования. Кроме того, применяемые методики довольно трудоемки, требуют высокой квалификация спе-

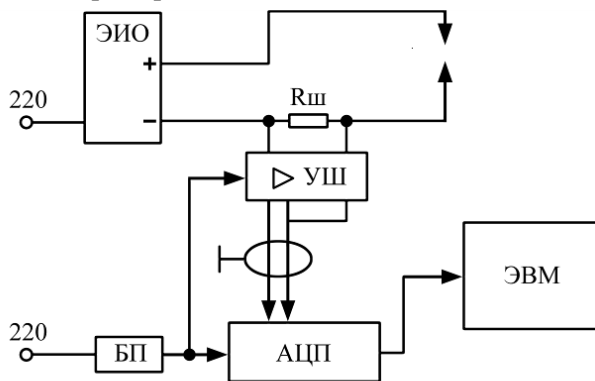
циалистов-электриков. А в итоге на производстве такое неудовлетворительное состояние энергетических исследований отражается в нестабильности процесса ЭИО и недостаточной эффективности ее применения.

Цель данной работы – разработка методики экспериментального определения энергетических параметров процесса ЭИО для использования ее при создании нового оборудования и отработке технологии ЭИО ответственных деталей, диагностирования ЭИ процесса при серийной обработке ответственных деталей и оборудования при его длительной эксплуатации, а также разработка критериев энергетической эффективности процесса ЭИО и методов их определения.

*Исследуемые параметры.* Методикой предусматривается определение трех групп параметров, характеризующих:

- электрический режим (удельное количество импульсов за единицу времени; характеры распределения импульсов по энергии и длительности; суммарная энергия импульсов за единицу времени; средняя энергия импульсов);
- параметры единичных импульсов (импульсный ток; максимальная энергия импульса; длительность и период следования импульсов).
- энергетическую эффективность процесса ЭИО.

*Оборудование.* Энергетические параметры определяются с использованием персонального компьютера и аналого-цифрового преобразователя, например Е-20-10.



ЭИО-установка

Rш-сопротивление шунта

УШ-усилитель шунта

БП-блок питания АЦП

АЦП-аналого-цифровой преобразователь

ЭВМ-компьютер

**Рис. 1.** Блок-схема комплекса для измерения энергетических характеристик установок ЭИО.

## ПОРЯДОК РАБОТЫ

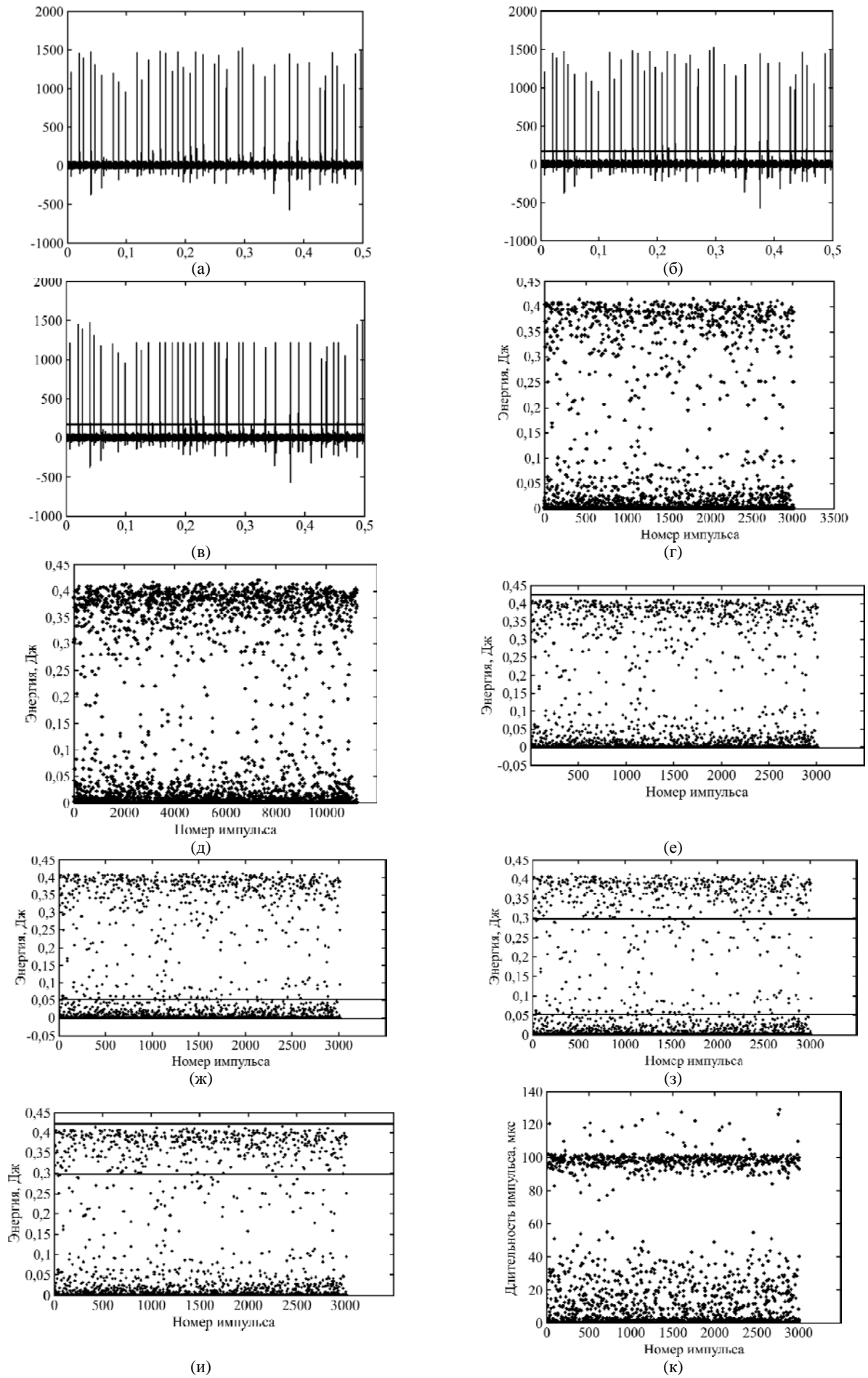
Для выполнения работы прошедшее поверку оборудование собирается согласно блок-схеме, представленной на рис. 1. Регистрируемые рабочие сигналы поступают с разрядного промежутка

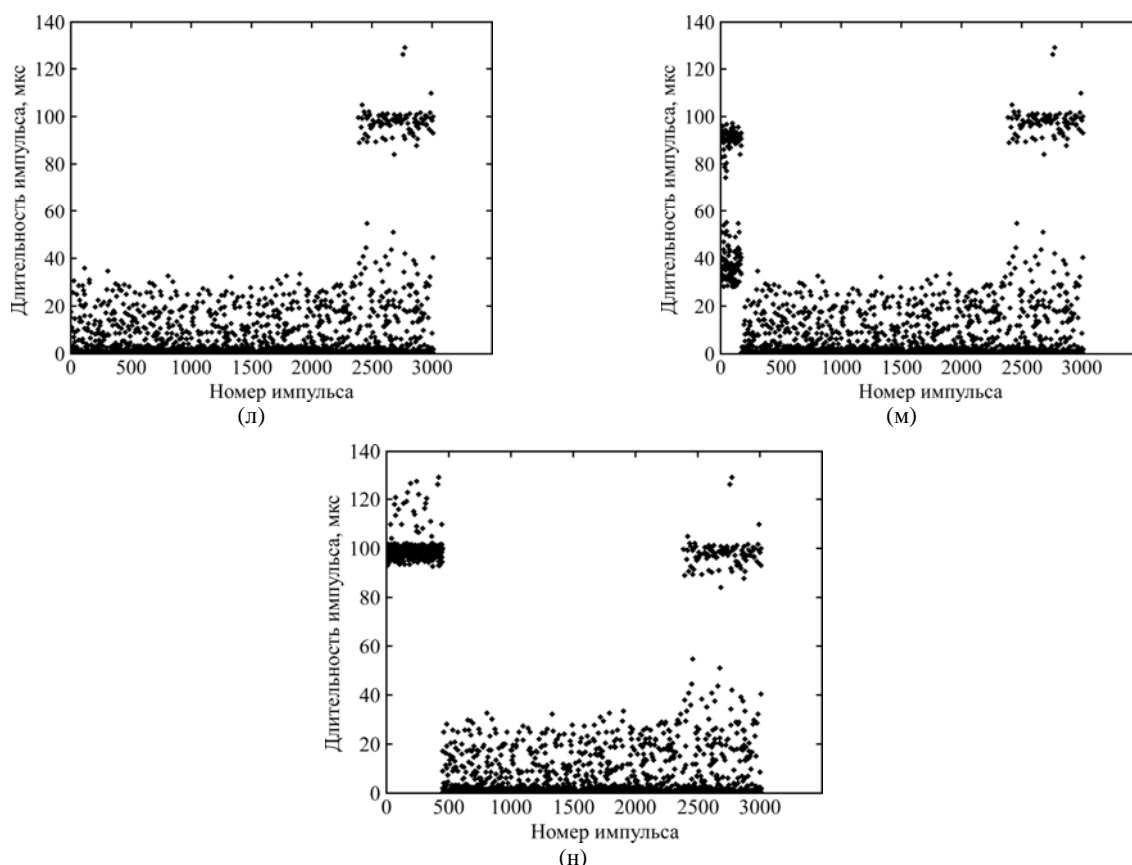
через шунт и записываются на компьютере при работе на выбранном электрическом режиме установки.

1. *Запись исходных данных.* Производится автоматически с применением компьютерной программы «LGraf» при ЭИО в выбранном электрическом режиме. Базовая длительность записи информации постоянна и равна 10 с, что обеспечивает стабилизацию процесса ЭИО и получение достоверных данных с учетом продолжительности одного периода следования импульсов до 5 мс. В необходимых, особо ответственных случаях запись выполняется троекратно.

2. *Определение параметров, характеризующих электрический режим.* Выполняется с помощью компьютерной программы «Matlab», адаптированной к исследуемому процессу ЭИО. На рис. 2 приведена последовательность обработки исходных данных на примере энергетических исследований 1-го электрического режима установки «БИГ-1».

Исходная *энергетическая картина* представлена на рис. 2а. Первой операцией обработки исходных данных является отсечка шумов квантования АЦП (рис. 2б), при этом отсекается низковольтная часть (нижняя зона), не связанная с искровым процессом. Далее результатом машинной обработки (рис. 2в) является получение картины (рис. 2г) распределения по величине энергии всех импульсов в течение базового времени. Произвольно выбрав любой импульс, можно определить в режиме «Измерение» его фактическую энергию; таким образом определяем максимальную энергию единичного импульса  $E_{\max}$  (рис. 2д). Следующая операция – определение энергетических параметров всего диапазона (рис. 2е) и его характерных зон: нижней, средней и верхней (соответственно рис. 2ж,з,и). Снимаем показания величин: суммарного числа импульсов ( $N_{\text{имп}}$ ,  $\Sigma$ ) за базовое время, суммарной энергии всех импульсов ( $E_{\Sigma}$ , Дж), средней энергии импульсов ( $E_{\text{ср}}$ , Дж), среднего квадратичного отклонения (СКО, %). Завершающим этапом работы в программе «Matlab» является получение картин распределения импульсов всего диапазона по их длительности (рис. 2к) и его характерных зон – нижней, средней и верхней (рис. 2л,м,н). Отметим особенность выделения характерных зон: низкоэнергетическая составляет до 20% от максимальной энергии; высокоэнергетическая – не менее 70%, остальное – среднеэнергетическая [14]. При этом добавим: средняя энергия импульсов низкоэнергетической зоны, как правило, не превышает 5% средней энергии высокоэнергетической зоны.





**Рис. 2.** Обработка экспериментальных данных по установке «БИГ-1» с применением компьютерной программы «Matlab» – Режим 1 (1–100 Гц) – Т15К6 на стали 45 (база измерений – 10 с). (а) – исходные данные; (б) – отсечка «шумов»; (в) – обработка исходных данных; (г) – распределение импульсов по величине энергии; (д) – определение импульса максимальной энергии; (е) – определение энергетических параметров всего диапазона; (ж), (з), (и) – определение энергетических параметров соответственно нижнего, среднего и верхнего диапазонов измерения; (к) – распределение импульсов по их длительности всего диапазона; (л), (м), (н) – распределение импульсов по их длительности соответственно нижнего, среднего и верхнего диапазонов измерения (только левые части, то есть № импульсов: 1 – 2390 (л), 1 – 174 (м) и 1 – 452 (н)).

3. *Определение параметров, характеризующих единичные импульсы.* Выполняется с помощью компьютерной программы «LGraf», адаптированной к исследуемому процессу ЭИО. На рис. 3 приведены результаты обработки экспериментальных данных на примере энергетических исследований 1-го электрического режима установки «БИГ-1».

Последовательность обработки:

1) в режиме «Измерение» в Утилитах идет компьютерная обработка осциллограммы и получение значения максимального импульсного тока (значение  $I_{\text{имп max}}$  – см. правую часть рисунка);

2) на осциллограмме выбирается характерный импульс энергии (см. верхнюю часть рисунка, где исследуемый импульс выделен прямоугольником);

3) на нижней части рисунка выделяются границы исследуемой зоны осциллограммы (зеленая линия – начало зоны; красная линия – конец зоны);

4) в окошке «dx» снимаются не менее 5 значений длительности импульса  $t_{\text{имп}}$ , рассчитывается и фиксируется среднее значение;

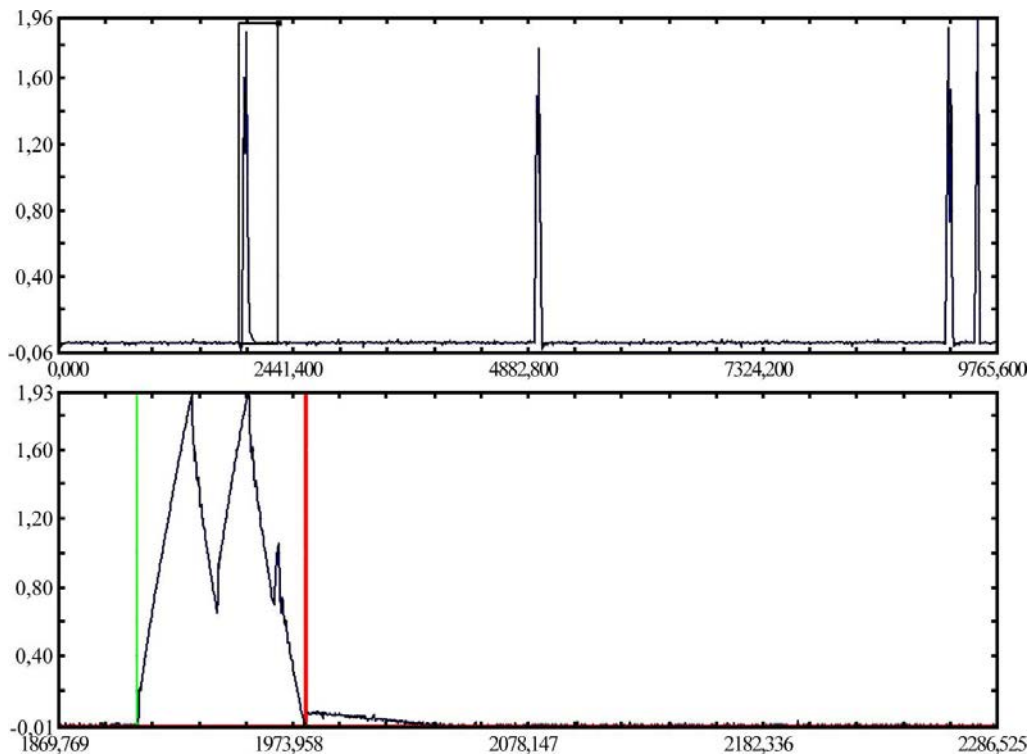
5) аналогично (2)–(4) одновременно определяются значения длительности периода  $T_{\text{имп}}$  не менее 5 импульсов, рассчитывается и фиксируется среднее значение;

б) рассчитывается и фиксируется среднее значение скважности импульсов  $S_{\text{имп}}$  верхнего диапазона измерений согласно формуле

$$S_{\text{имп}} = T_{\text{имп}} / t_{\text{имп}} \quad (1)$$

4. *Определение параметров, характеризующих энергетическую эффективность процесса ЭИО.* В настоящее время отсутствуют единые критерии энергетической эффективности процесса ЭИО, которая отражает работу комплекса «генератор искровых импульсов – обрабатывающее устройство» и влияет на технологические параметры процесса обработки и ее результаты. В данной работе предлагается связать эти критерии с энергетическими картинками, о которых речь шла выше.

На основании значений приведенных выше параметров электрических режимов (число импульсов и их энергия) выполняется расчет их



**Рис. 3.** Обработка экспериментальных данных по установке «БИГ-1» с применением компьютерной программы «Matlab» – Режим I, 100 Гц, Т15К6 на стали 45 (база измерений – 10 с). Режим I, частота вибрации 100 Гц  $I_{\text{имп max}} = 109,126$  А.

энергетической эффективности. Для этого определяются следующие три параметра:

1) коэффициент  $S_N$ , определяющий энергетическую эффективность процесса ЭИО по удельному числу рабочих импульсов в общем количестве импульсов, определяемый по формуле

$$S_N = N_{\text{мощ}} / N_{\Sigma}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{мощ}}$  – количество мощных (рабочих) электрических импульсов;  $N_{\Sigma}$  – количество всех записанных электрических импульсов.

2) коэффициент  $S_E$ , определяющий энергетическую эффективность процесса ЭИО по удельному количеству общей энергии рабочих импульсов в суммарной энергии всех записанных электрических импульсов, который определяется по формуле

$$S_E = E_{\text{мощ}} / E_{\Sigma}, \quad (3)$$

где  $E_{\text{мощ}}$  – суммарная энергия записанных рабочих электрических импульсов, Дж;  $E_{\Sigma}$  – суммарная энергия всех записанных электрических импульсов за базовый временной период, Дж.

3) комплексный энергетический параметр  $C$ , характеризующий эффективность процесса ЭИО с учетом количественного и энергетического коэффициентов, то есть

$$C = S_N \times S_E. \quad (4)$$

В качестве примера ниже приведены результаты энергетических исследований нескольких

электрических режимов установки «БИГ-1», технические параметры которой указаны в табл. 1.

Здесь для исследований выбраны режимы обработки, различающиеся по энергии импульсов и частоте вибрации электрода (выделено в табл. 1).

Как видно из рис. 4, энергетические картины процесса ЭИО стали 45 твердым сплавом Т15К6 значительно различаются как насыщенностью импульсами в разных энергетических зонах, так и по их количеству. Это подтверждает возможность фиксирования особенностей данного импульсного процесса обработки, на энергетические параметры которого, очевидно, влияют не только характеристики режимов генератора, но в значительной степени и механические параметры работы электрода-инструмента. Последнее связано с характером, длительностью и стабильностью единичных контактов анода с катодом, что зависит от схемы обработки «электрод – деталь», жесткости контакта, технического состояния электрода-инструмента.

Результаты компьютерной математической обработки энергетических картин приведены в табл. 2. Согласно данным таблицы, исследованы I, III и VI режимы с энергией искровых импульсов до  $E_{\text{max}} = 2,34$  Дж. При этом максимальный импульсный ток электрических режимов находился в пределах  $I_{\text{имп max}} = 107\text{--}575$  А, а длительность рабочих импульсов (средний и верхний уровни всего диапазона измерений)  $t_{\text{имп}} = 20\text{--}175$  мкс.

**Таблица 1.** Основные характеристики режимов установки «БИГ-1» (емкость накопительных конденсаторов  $C = 360$  мкФ)

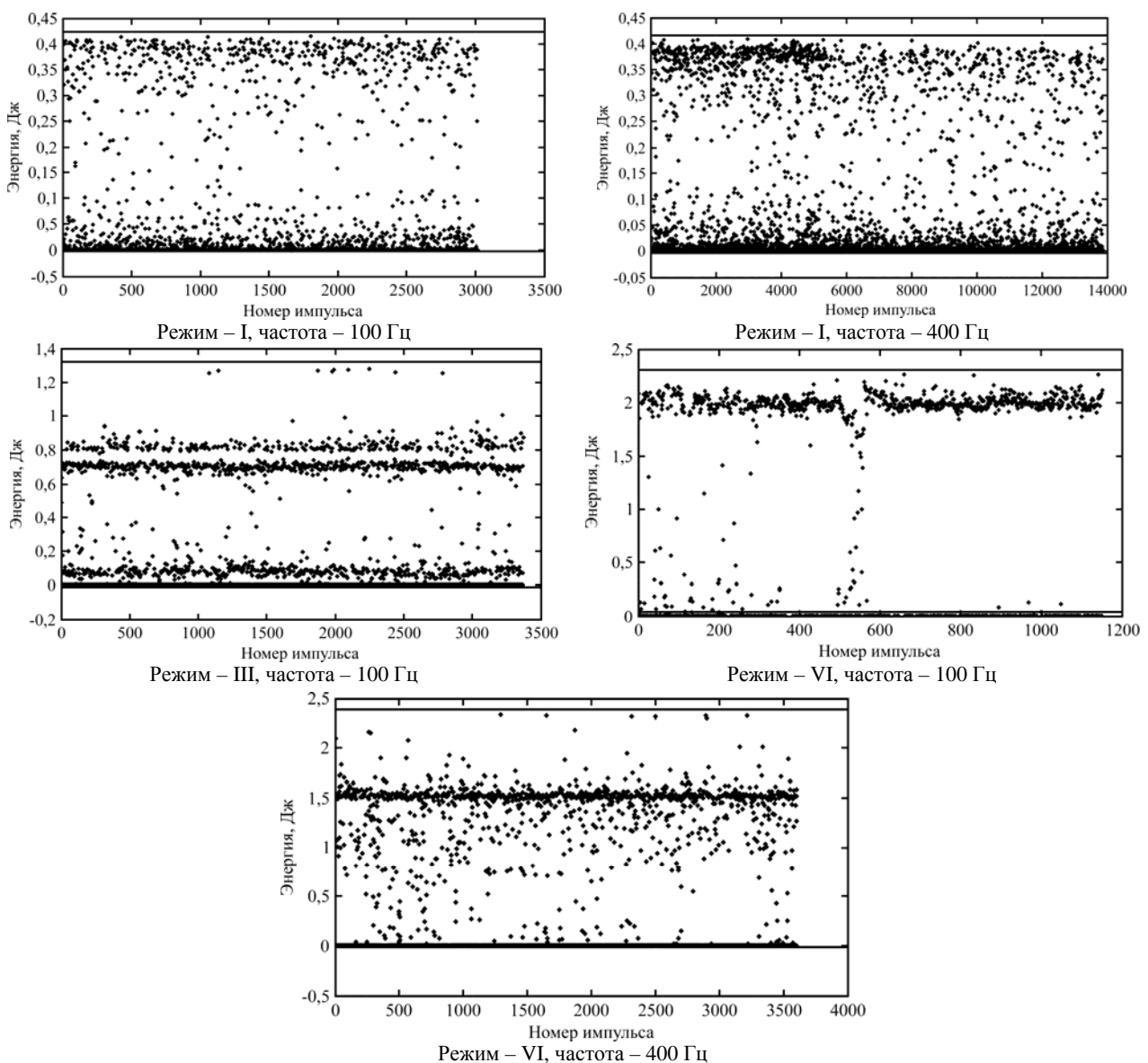
№ режима	Энергия импульсов $E$ , Дж *	Рабочий ток ( $A$ ) при частоте вибрации электрода, Гц		
		100	250	400
I	0,07	<b>0,4</b>	0,8	<b>0,4</b>
II	0,14	1,0	1,6	1,4
III	0,33	<b>1,4</b>	2,8	2,2
IV	0,56	2,0	3,0	3,5
V	0,87	2,3	3,2	3,6
VI	1,56	<b>2,8</b>	3,5	<b>4,0</b>

\* Емкость накопительных конденсаторов  $C = 360$  мкФ.

Примечание. Энергия импульсов  $E$  определена с использованием соотношения

$$E = UIt,$$

где  $U$  – падение напряжения в искровом промежутке (ориентировочно составляет 17–20 В);  $I$  – амплитудное значение тока (А);  $t$  – длительность импульса (с).



**Рис. 4.** Энергетические картины ЭИО на установке «БИГ-1».

Анализируя данные табл. 2, отметим характерный результат, а именно: во всех случаях ЭИО основная энергия, выделившаяся за 10 с, приходится на верхний энергетический уровень

(70–90%). Определенной значимостью обладают импульсы среднего уровня, средняя энергия которых в данном случае в 1,8–3,4 раза ниже средней энергии импульсов верхнего уровня. Однако

**Таблица 2.** Энергетические параметры режимов установки «БИГ-1» (база измерений – 10 с)

Диапазон измерений	Значения параметров для электрических режимов						
	$E_{\min}-E_{\max}$ , Дж	$I_{\text{имп max}}$ , А	$N_{\text{имп } \Sigma}$	$E_{\Sigma}$ , Дж	$E_{\text{ср}}$ , Дж	СКО	$t_{\text{имп}}$ , мкс
Режим I, частота – 100 Гц (Т15К6 на стали 45)							
Весь диапазон	0–0,43	109,126	4881	265,8856	0,0545	0,1349	1–130
Нижний уровень	0–0,05		3921	17,5332	0,0045	0,0098	1–36
Средний уровень	0,05–0,3		226	33,8016	0,1496	0,0840	28–96
Верхний уровень	0,3–0,43		588	213,2222	0,3626	0,0280	92–130
Режим I, частота – 400 Гц (Т15К6 на стали 45)							
Весь диапазон	0–0,41	107,301	13868	398,4278	0,0287	0,0912	1–138
Нижний уровень	0–0,05		12601	23,6509	0,0019	0,0060	1–40
Средний уровень	0,05–0,3		429	70,6874	0,1648	0,0869	25–105
Верхний уровень	0,3–0,41		833	303,8268	0,3647	0,0246	96–138
Режим III, частота – 100 Гц (Т15К6 на стали 45)							
Весь диапазон	0–1,275	310,109	3371	707,3056	0,2098	0,3242	1–175
Нижний уровень	0–0,15		2435	38,4214	0,0158	0,0331	1–95
Средний уровень	0,15–0,62		82	27,679	0,3375	0,1570	86–175
Верхний уровень	0,62–1,275		850	639,1437	0,7519	0,0846	80–175
Режим VI, частота – 100 Гц (Т15К6 на стали 45)							
Весь диапазон	0–2,25	575,114	814	1506,1736	1,8503	0,4783	1–148
Нижний уровень	0–0,08		241	0,5722	0,0017	0,0053	1–20
Средний уровень	0,08–1,7		33	47,0478	0,5668	0,5709	20–95
Верхний уровень	1,7–2,25		536	1469,4355	1,9965	0,0695	95–148
Режим – VI, частота – 400 Гц (Т15К6 на стали 45)							
Весь диапазон	0–2,34	541,278	3603	1519,6254	0,4218	0,6573	1–175
Нижний уровень	0–0,05		2466	1,3594	0,0005	0,0025	1–44
Средний уровень	0,05–1,3		359	317,6283	0,8848	0,3896	28–175
Верхний уровень	1,3–2,34		775	1195,2788	1,5423	0,1193	88–175

Примечание. Допускается не более чем 10% отклонение суммы значений  $N_{\text{имп } \Sigma}$  нижнего, среднего и верхнего уровней по отношению к значению  $N_{\text{имп } \Sigma}$  всего диапазона.

**Таблица 3.** Параметры энергетической эффективности процесса ЭИО (установка «БИГ-1»)

Показатели	Режим генератора/частота вибрации электрода (Гц)				
	1/100	1/400	3/100	6/100	6/400
Число импульсов $N_{\text{пасп}}$ за 10 с согласно паспортным данным	1000	4000	1000	1000	4000
Число импульсов $N_{\Sigma}$ за 10 с согласно экспериментальным данным/число рабочих импульсов $N_{\text{моц}}$	4881/814	13868/1262	3371/932	814/569	3603/1134
Соотношение $\Delta = N_{\text{моц}}/N_{\text{пасп}}$	0,81	0,32	0,93	0,57	0,28
Коэффициент $S_N = N_{\text{моц}}/N_{\Sigma}$	0,167	0,091	0,276	0,699	0,315
Суммарная энергия импульсов $E_{\Sigma}$ / энергия рабочих импульсов $E_{\text{моц}}$ (Дж)	266/247	398/374	707/667	1506/1469	1520/1513
Коэффициент $S_E = E_{\text{моц}}/E_{\Sigma}$	0,929	0,940	0,943	0,975	0,995
Комплексный параметр $C = S_N \times S_E$	0,155	0,085	0,260	0,681	0,313

Примечание. Использованы исходные данные из табл. 2.

значительное количество импульсов зафиксировано в нижнем диапазоне (30–90% от общего числа), которые обладают очень малой энергией ( $E_{\text{ср}} = 0,0005–0,0158$  Дж), в 80–2000 раз ниже энергии импульсов верхнего диапазона.

Видно также значительное различие энергетических диапазонов по длительности импульсов: наибольшей длительностью обладают импульсы верхнего диапазона  $t_{\text{имп}} = 80–175$  мкс, при этом скважность  $S_{\text{имп}} = 5–7$ .

Определим параметры энергетической эффективности процесса ЭИО. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Как видно из таблицы, фактически зарегистрированное количество импульсов (как общее  $N_{\Sigma}$ , так и рабочих  $N_{\text{мощ}}$ ) отличается в разной степени от паспортных значений ( $N_{\text{пасп}} = 1000$  импульсов – для частоты вибрации электрода 100 Гц и  $N_{\text{пасп}} = 4000$  импульсов – для частоты 400 Гц). Так, для рабочих импульсов исследованных режимов  $\Delta = 0,28–0,93$ , то есть их количество меньше расчетного согласно паспортным данным установки. Ввиду того, что энергетические измерения выполнялись на разных режимах и частоте вибрации электрода, но при одинаковых условиях, то есть одним опытным оператором, одним электродом, с использованием стальных образцов одинаковых размеров с одинаковым качеством поверхности ( $R_a = 1,6–2,0$  мкм), это отличие, очевидно, объективно и фактически отражает комплексную работу генератора и вибратора установки, а именно электрического и механического компонентов. Природа такого расхождения расчетных (паспортных) и фактических данных неизвестна, по-видимому, это расхождение связано в большей степени с работой вибратора; эта проблема требует дальнейших исследований.

Уровень стабильности функционирования электромеханической системы (генератор-вибратор) отражает, как отмечалось выше, количественный коэффициент  $S_N$ . В нашем случае его значения находятся в пределах 0,091–0,699. Видна тенденция роста значений этого коэффициента с увеличением номера режима, то есть энергии импульсов. Также очевидно обратное влияние частоты вибрации электрода: с ее повышением от 100 до 400 Гц значение коэффициента  $S_N$  снижается в 2 раза. Природа этого явления тоже требует дополнительного изучения.

Вторым параметром, характеризующим стабильность и эффективность функционирования электромеханической системы, является энергетический коэффициент  $S_E$ . Как видно из табл. 3, суммарная энергетическая доля нерабочих импульсов, несмотря на их большое количество, ничтожна; общая энергия представлена в основном рабочими импульсами, то есть  $S_E = 0,929–0,995$ . При этом значения данного коэффициента растут и с увеличением электрического режима, и с повышением частоты вибрации электрода.

Данные табл. 3 показывают, что характер изменения комплексного энергетического параметра  $\epsilon$ , отражающего эффективность процесса ЭИО с учетом количественного и энергетическо-

го коэффициентов, в наиболее значительной степени зависит от величины  $S_N$ . Применительно к этим условиям  $\epsilon = 0,085–0,681$ , причем увеличение энергии импульсов от 0,07 (I режим) до 1,56 Дж (VI режим) отразилось на росте параметра  $\epsilon$  в 4 раза, а увеличение частоты вибрации электрода – на снижении его в 2 раза. Очевидно влияние механической составляющей системы «генератор – вибратор».

Таким образом, имея конкретные результаты приведенных энергетических исследований, можно по необходимости проверять стабильность работы технологического комплекса, обеспечивающего в свою очередь стабильность результатов ЭИО.

В заключение отметим, что описанная новая методика, разработанная на основе патента Российской Федерации [14, 15], достаточно проста в освоении техническим персоналом, используется в ФГБНУ ГОСНИТИ при испытаниях нового оборудования для ЭИО и проведении исследовательских работ. Она может быть рекомендована исследователям электрических импульсных процессов, разработчикам оборудования для импульсной обработки, для оценки технического состояния такого технологического оборудования и стабильности осуществления процесса обработки на современном высокоточном производстве.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана и практически используется новая методика экспериментального определения энергетических параметров процесса ЭИО при создании нового оборудования, отработке технологии ЭИО ответственных деталей, диагностировании электроискрового процесса при серийной обработке ответственных деталей и оборудования при его длительной эксплуатации.
2. Разработаны критерии энергетической эффективности процесса ЭИО.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.П., Ивашко В.С., Константинов В.М., Лялякин В.П., Пантелеенко Ф.И. *Восстановление и упрочнение деталей*. Справочник. М.: Наука и технологии, 2013. 367 с.
2. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. *Материаловедение*. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.
3. *Способ нанесения металлических покрытий*. Авт. изобрет. Б.Р. Лазаренко Авт. свид. 89933 (СССР). Оpubл. в БИ, 1951, № 12.
4. Лазаренко Н.И. Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами. *Электроискровая обработка металлов*. М.: Изд-во АН СССР, 1960, вып. 2. С. 26–66.



5. Иванов Г.П. *Технология электроискрового упрочнения инструмента и деталей машин*. М.: Машгиз, 1961. 302 с.
6. Верхотуров А.Д., Муха И.М. *Технология электроискрового легирования металлических поверхностей*. Киев: Техника, 1982. 182 с.
7. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
8. Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В., Иванов В.И., Величко С.А., Ионов П.А. *Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика)*. Саранск: Красный Октябрь, 2003. 504 с.
9. Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х. Состояние и развитие электроискровых технологий и оборудования в России и за рубежом. *Труды ГОСНИТИ*. 2012, **109**(2), 127–139.
10. Рыбалко А.В., Симинел А.В., Сахин О. Электроискровое легирование изоэнергетическими импульсами тока различной формы. *Металлообработка*. 2003, (1), 18–23.
11. Mulin Y.I., Klimova L.A., Dmitriev D.A. Technological Solution of Forming Coatings with Required Depth During Electrospark Alloying. *Russian Technical News Letter, Rotobo*. 2001, (3), 30–31.
12. Химухин С.Н. Условия возникновения искрового процесса при низковольтной электроискровой обработке. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2007, (1), 12–15.
13. Николенко С.В. Некоторые аспекты механизированного электроискрового легирования стали вращающимся торцевым электродом твердыми сплавами с различной частотой и длительностью электрических импульсов. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2011, (5), 21–27.
14. Черноиванов В.И., Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х., Поддубняк В.Я. *Способ определения энергетической эффективности процессов обработки материалов электроискровым легированием*. Патент РФ № 2482943 по заявке № 2011135300 от 24.08.2011.
15. Иванов В.И., Поддубняк В.Я. Об определении энергетических параметров процесса электроискровой обработки металлических поверхностей. *Материалы 16-й Международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика»*. Санкт-Петербург, 15–18 апреля 2014, СПб: Изд-во Политехн. ин-та, 2014, Часть 2. с. 64–67.

Поступила 02.06.14

После доработки 31.07.14

### Summary

The article describes a new method of determining the energy parameters of using the electrical discharge machining (EDM) for processing metal surfaces, including the definition of three groups of parameters those characterizing: the electrical mode on energy patterns; single pulses; the energy efficiency of the EDM. The proposed technique is intended for research purposes, when creating new equipment, elaborating the EDM technology for critical parts, diagnosing the processing of critical parts and equipment in continuous operation.

*Keywords: spark erosion, electric mode, energy parameters, energy pattern, spark pulse, pulse energy, pulse current, energy efficiency.*