

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Произведен расчёт энергии электрических импульсов на основе экспериментальных данных. Получены аналитические и графические зависимости энергии электрических импульсов от напряжения силового блока питания экспериментальной установки при различных значениях длительности импульсов. Получены аналитические и графические зависимости тепловой энергии электрических импульсов.*

*Ключевые слова: Электрический взрыв проводников, экспериментальная установка, осциллограмма, трансформатор, импульс.*

I.A. GETMAN

Donbass State Engineering Academy  
V.V. DERZHEVETSKYI, S.V. GONCHARENKO  
Novokramatorsky Mashynobudivny Zavod**INVESTIGATION OF PARAMETERS OF SETTING OF ELECTROPHYSICAL  
HANDLING OF THE CONDUCTIVE MATERIAL**

*The energy calculation of electric pulses was produced on the basis of experimental data. Analytical and graphical dependence of the energy of electric impulses on the voltage of the power supply unit of the experimental setup with different values of the pulse duration were obtained. Analytical and graphical dependence of thermal energy electrical impulses were obtained.*

*Keywords: Electric explosion of conductors, experimental setup, waveform, the transformer, impulse.*

Электрический взрыв проводников (ЭВП) достаточно активно исследуется в последние десятилетия. Интерес к этому явлению обусловлен бурным развитием физики высоких плотностей энергий, изучением экстремальных состояний вещества при высоких давлениях и температуре, рядом практических применений, связанных с современными исследованиями в области энергетики, космической техники, нано технологий и в других областях науки. Некоторые явления, происходящие при ЭВП, оказываются достаточно сложными для строгих теоретических исследований. Поэтому, по-прежнему актуальна задача получения соотношений, описывающих взаимосвязь характера выделения энергии в проводнике в процессе взрыва с его физическими свойствами, основанных на методах теории подобия. Создание сверхтвёрдых нанокompозитных плёнок и покрытий с их уникальными прочностными свойствами является одним из важных направлений развития с новыми возможностями целенаправленного формирования комплекса их физических свойств. Это стало возможным благодаря использованию ряда физических явлений [1,2] и созданию новых технологических подходов.

Помимо упрочнения металлических изделий, интересным остается вопрос создания новых материалов и упрочняющих покрытий, которые могут найти свое применение в металлообработке. Если непрерывно пропускать электрический ток через металлическое изделие, существует большая вероятность того, что поверхность или свойства или даже геометрические размеры металлического изделия изменятся, что приведет его в негодность.

В случае с импульсным током, нагрев происходит в очень малом промежутке времени и при этом появляется возможность пропускать через изделия намного более высокие значения силы тока. Сегодня собрано огромное количество экспериментальных данных, которые практически подтверждают положительные изменения в молекулярной структуре металлических изделий, подвергшихся электроимпульсной обработке [3].

Разработана экспериментальная установка для обработки материалов импульсным электрическим током с компьютерным управлением процессом.

Целью данной работы является повышение надёжности управления импульсным режимом работы установки.

Задачами являются:

- исследовать электрические схемы экспериментальной установки на предмет наименее надежных её звеньев;
- исследовать переходные процессы экспериментальной установки с целью обнаружения факторов, требующих коррекции;
- исследовать силовые элементы установки на предмет тепловыделения.

Экспериментальная установка предназначена для осуществления синтеза вещества в импульсном электрическом разряде в режиме одиночного импульса или нанесения покрытия на металлическую поверхность из электрода или по слою порошка.

Разработанная установка имеет структурную схему, представленная на рис. 1.

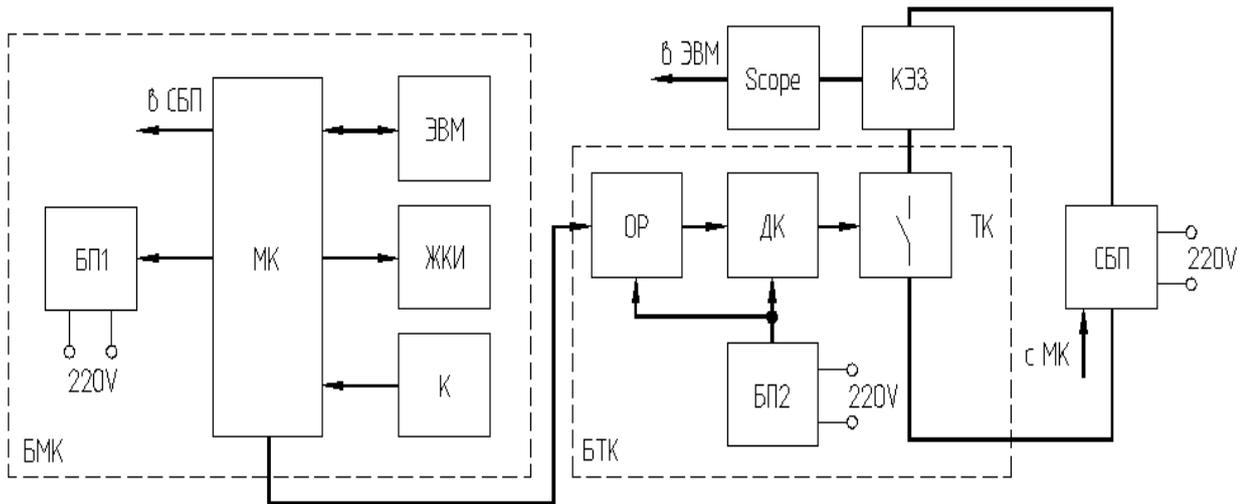


Рис. 1. Структурная схема установки:

БМК - блок микроконтроллера; МК - микроконтроллер; БТК - блок транзисторного ключа; ОР - оптронная развязка; ТК - транзисторный ключ; ДК - драйвер транзисторного ключа; КЭЗ - контакт «электрод-заготовка»; БП1, БП2 - блоки питания электроники; СБП – силовой блок питания; ЭВМ - электронно-вычислительная машина; ЖКИ - жидкокристаллический индикатор; К - клавиатура

В ходе практических испытаний установки удалось получить массив данных, описывающий дискретные выходные значения токов, напряжений, мощности, а также энергий импульса при различных значениях напряжения на первичной обмотке трансформатора блока питания, а также при различной длительности электрических импульсов.

Экспериментальные исследования выходных параметров установки были произведены при следующих значениях напряжения блока питания: 13,5 В, 27,8 В, 42 В, 58 В, 72 В, 108 В.

Для каждого из приведенных напряжений произведены измерения при различных длительностях импульса: 20 мкс, 25 мкс, 30 мкс, 35 мкс, 40 мкс. В качестве нагрузки (КЭЗ – контакт «электрод – заготовка») использовался набор резисторов с общим сопротивлением равным  $R=0,16$  Ом.

Работа установки осуществляется после включения силового блока питания (СБП) и работает следующим образом: сигнал от микроконтроллера (МК) подается на блок транзисторного ключа (БТК), который представляет собой набор параллельно включенных силовых IGBT транзисторов, и проходит через оптронную развязку (ОР) на драйвер транзисторного ключа (ДК), где он усиливается и открывает транзисторный ключ (ТК). В этот момент электрическая цепь замыкается и импульс тока от силового блока питания (СБП) проходит через контакт «электрод-заготовка» (КЭЗ). Через заданный интервал времени микроконтроллер (МК) закрывает транзисторный ключ (ТК), таким образом формируя длительность импульса тока. Напряжение необходимого уровня формируется в силовом блоке. Выходные параметры работы установки снимаются с помощью цифрового осциллографа, подключаемого к местам ДТ и ДН на схеме экспериментальной установки. Настройка параметров работы устройства осуществляется с помощью клавиатуры (К) и жидкокристаллического индикатора (ЖКИ), а также с помощью компьютера через COM порт.

Для экспериментальных исследований был использован цифровой осциллограф Rigol DS5000, программное обеспечение которого позволяет получать дискретные таблицы данных, описывающие наблюдаемый вид электрического сигнала, а также цифровой пирометр (инфракрасный термометр) GM 700 с диапазоном измерения температур от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $700^{\circ}\text{C}$ , который позволил исследовать БТК на нагрев при различных режимах работы экспериментальной установки. Хотя максимально возможное напряжение вторичной обмотки используемого трансформатора превышает использованные в ходе наших исследований 108 В, данная величина напряжения стала максимально допустимой для используемой измерительной техники.

Полученные данные в дальнейшем были обработаны рядом специализированных программ, разработанных в среде Matlab. Далее приведен ряд функций, выполняемых программным обеспечением:

- конвертация табличных данных, получаемых с цифрового осциллографа, в визуальную форму;
- расчёт мощностей, энергии, а также скорости нарастания силы тока электрических импульсов.
- построение вольт-амперных характеристик на основе полученных экспериментальных данных;
- автоматическое построение ряда зависимостей входных и выходных величин на основе полученных экспериментальных данных.

На рис. 2 приведены 5 графически-интерпретированных осциллограмм, полученных в ходе экспериментальных исследований при различных напряжениях силового трансформатора. Данные изображения были получены непосредственно в программной среде Matlab.

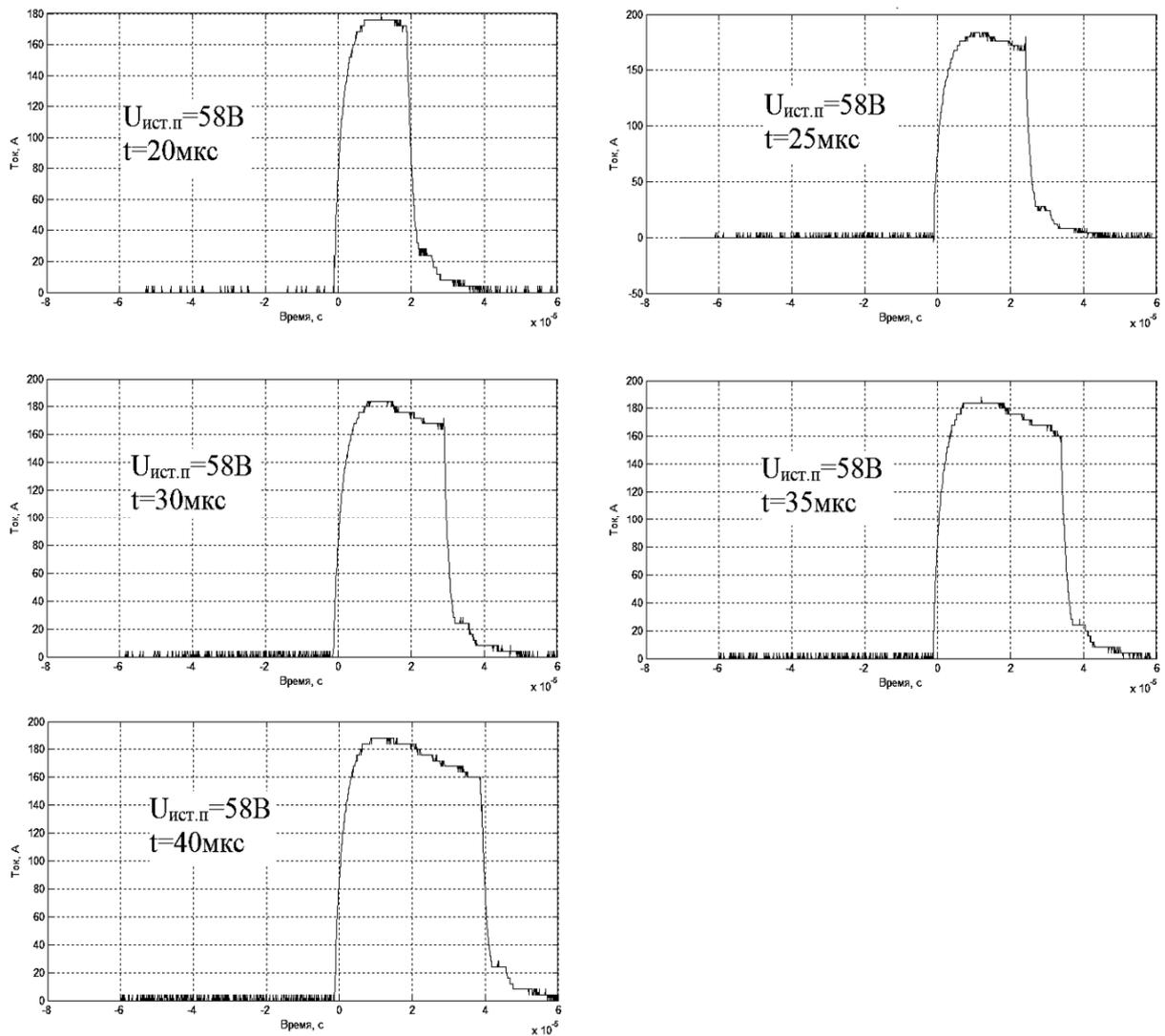


Рис. 2. Графически-интерпретированные осциллограммы, полученных в ходе экспериментальных исследований установки.

Энергия электрических импульсов рассчитывалась методом дискретного интегрирования. Энергия одного электрического импульса представляет собой интеграл по мощности данного импульса на временном промежутке его существования:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P dt \quad (1)$$

На рис. 3 приведена графическая зависимость энергии электрических импульсов, полученной в ходе обработки экспериментальных данных, от значений напряжения вторичной обмотки трансформатора блока питания экспериментальной установки, при различных значениях длительности электрических импульсов.

На основании экспериментальных исследований были получены данные, описывающие выходные параметры работы установки в определенном диапазоне используемого напряжения на трансформаторе силового блока питания. Для моделирования выходных характеристик экспериментальной установки не только в пределах допустимых для измерения значений электрических сигналов, но также и во всей области возможных режимов работы установки, было принято решение вывести ряд уравнений, которые бы смогли описать зависимости, полученные в ходе практических исследований.

Для решения этой задачи было принято решение применить метод аналитического выравнивания, который заключается в построении уравнений регрессии, характеризующих зависимости уровней ряда выходных данных экспериментальной установки от напряжения вторичной обмотки трансформатора блока питания.

Для нахождения параметров данных уравнений был использован метод наименьших квадратов с проведением расчетов по известным методикам. Рассчитав данным методом функции зависимостей энергии от напряжения блока питания для всех исследуемых длительностей импульса, был получен ряд графиков, представленный на рис. 3.

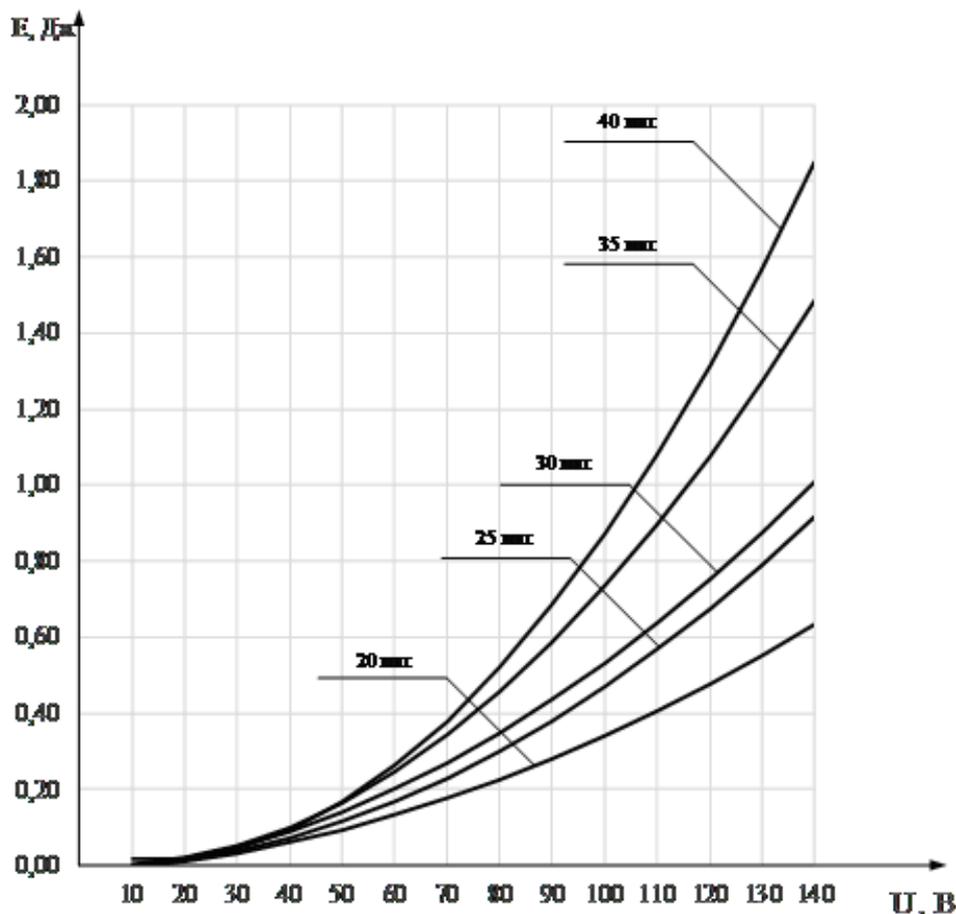


Рис. 3. Зависимость энергии электрических импульсов от напряжения блока питания экспериментальной установки при различных значениях длительности импульсов, полученная путем аналитического выравнивания

Уравнения зависимости энергии импульса от напряжения на блоке питания при различных значениях длительности импульса электрического тока:

$$\begin{aligned}
 E_{(20\text{мкс})} &= 2,7 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 + 8,82 \cdot 10^{-4} \cdot U - 1,78 \cdot 10^{-2}; \\
 E_{(25\text{мкс})} &= 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 + 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot U - 7,61 \cdot 10^{-3}; \\
 E_{(30\text{мкс})} &= 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 + 9,14 \cdot 10^{-4} \cdot U - 1,97 \cdot 10^{-2}; \\
 E_{(35\text{мкс})} &= 8,2 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 - 9,17 \cdot 10^{-4} \cdot U + 6,2 \cdot 10^{-3}; \\
 E_{(40\text{мкс})} &= 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot U^2 - 3,15 \cdot 10^{-3} \cdot U + 3,63 \cdot 10^{-2};
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

На рис. 4 представлен график зависимости пикового значения силы тока на нагрузке от напряжения вторичной обмотки трансформатора блока питания, полученная путем аналитического выравнивания.

Уравнение зависимости амплитудного значения силы импульса электрического тока от напряжения на блоке питания при различных значениях длительности импульса:

$$I = -4,43 \cdot 10^{-3} \cdot U^2 + 3,666 \cdot U - 15,177;
 \tag{3}$$

В ходе практических испытания экспериментальной установки по тепловыделению было принято решение исследовать температуру одного транзистора. Исследования проводились при следующих значениях напряжения блока питания: 13,5 В, 27,8 В, 42 В, 58 В, 72 В, 108 В. Кроме того, для каждого из приведенных выше напряжений были произведены измерения при различных длительностях импульса: 20 мкс, 25 мкс, 30 мкс, 35 мкс, 40 мкс. Сопротивление нагрузки составляло 0,15 Ом.

Температура окружающей среды составляла 24°C. На первый взгляд, казалось бы, многие факторы, которые влияют на изменение температуры транзистора, учтены, но полученные данные были весьма сомнительны. Как было указано ранее, на неработоспособность транзистора указывала пробитие кристалла полупроводника (в нашем случае). Опираясь на экспериментальные данные по тепловыделению невозможным считается утверждать, что кристалл вышел из строя при температуре 49,5°C, так как применяемый тип транзистора в экспериментальной установке рассчитан на более высокую температуру эксплуатации, которая составляет +150°C. В результате было принято решение провести расчет по

изменению температуры кристалла полупроводника за время прохождения через него единичного (мгновенного) импульса электрического тока.

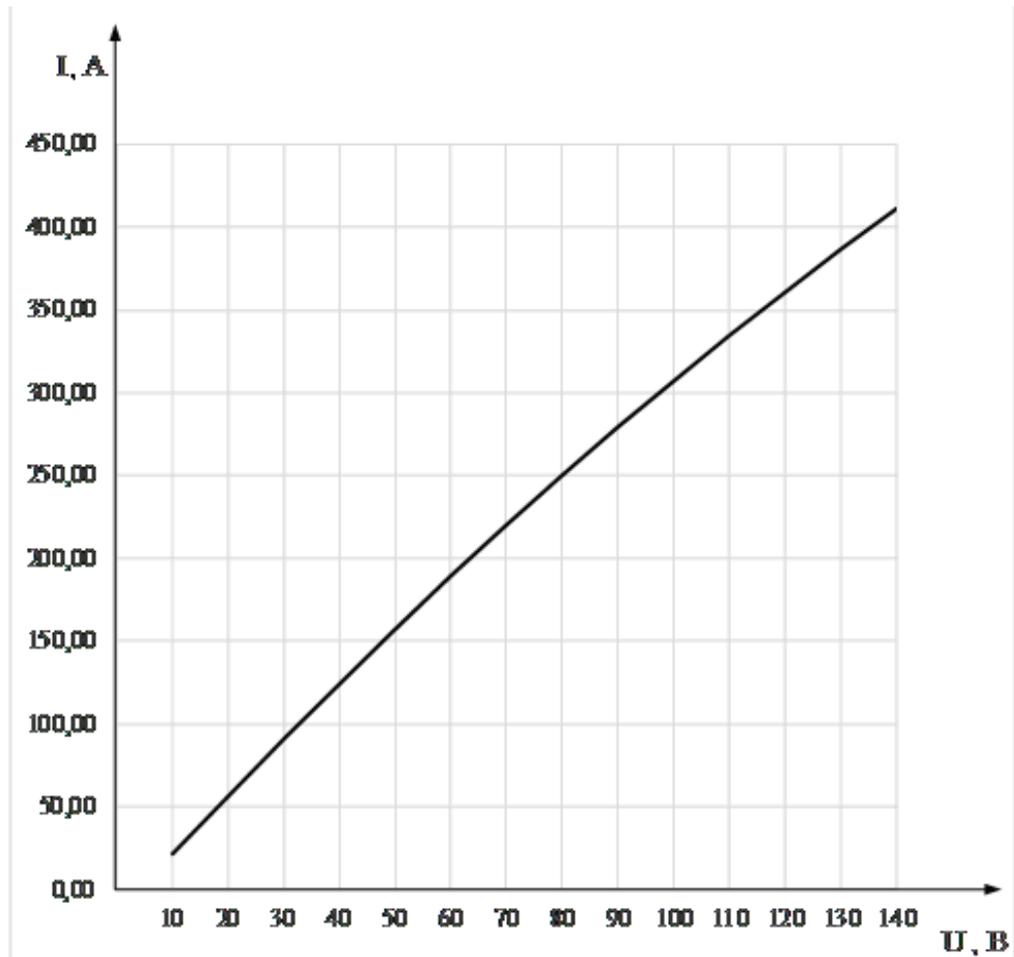
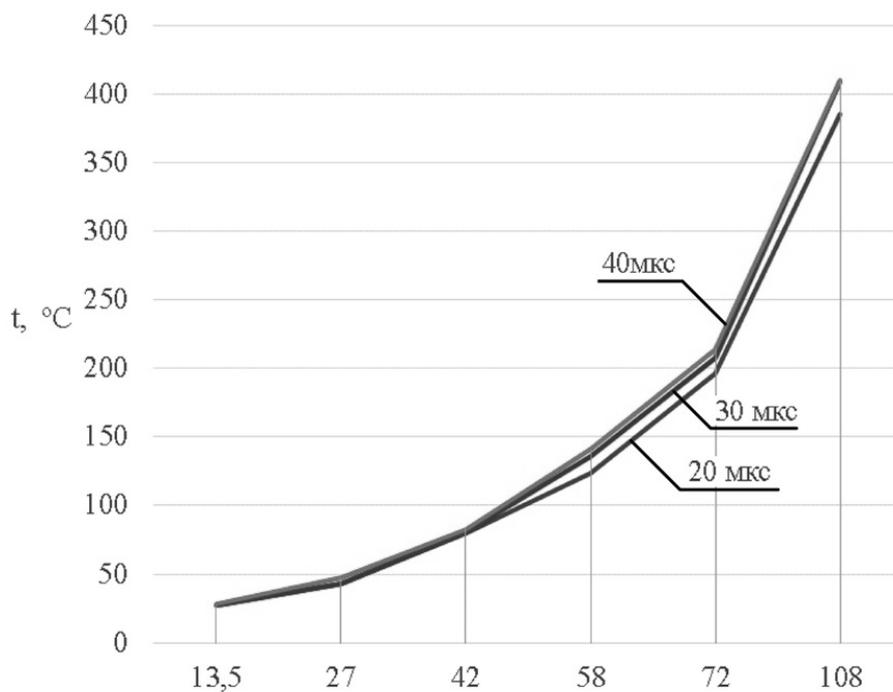


Рис. 4. Зависимость пикового значения силы тока на нагрузке от напряжения вторичной обмотки трансформатора блока питания, полученная путем аналитического выравнивания



Улит.

Рис. 5. Зависимость изменения температуры от напряжения блока питания экспериментальной установки при различных значениях длительности импульсов

Расчет температуры производится по следующей формуле:

$$T = P \cdot (R_{jc} + R_b + R_{hc}) + T_a; \quad (4)$$

где  $T$  - температура кристалла транзистора;  $P$  - средняя мощность импульса;  $R_{jc}$  - справочное значение теплового сопротивления кристалл-корпус (документация транзистора, в нашем случае транзистор IRG4PC50FD является равным 0,64);  $R_b$  - тепловое сопротивление термопасты (в нашем случае 0);  $R_{hc}$  - тепловое сопротивление радиатора (в нашем случае 0);  $T_a$  - температура окружающей среды (в программе по умолчанию принята 24°C).

На рис. 5 представлен график зависимости изменения температуры от напряжения блока питания экспериментальной установки при различных значениях длительности импульсов.

Полученные таким образом аналитические и графические зависимости позволяют прогнозировать поведение работы установки при различных режимах, прогнозировать возможность применения элементов электронных схем, параметров взаимодействия в контакте «электрод – заготовка».

### Выводы

Проведены экспериментальные исследования энергетических характеристик импульсного режима работы установки.

Произведен расчёт энергии электрических импульсов на основе экспериментальных данных. Получены аналитические и графические зависимости энергии электрических импульсов от напряжения силового блока питания экспериментальной установки при различных значениях длительности импульсов. Получены аналитические и графические зависимости тепловой энергии электрических импульсов. На основе экспериментальных данных получена вольтамперная характеристика амплитудных значений силы импульсного тока.

Полученные зависимости позволяют прогнозировать возможность применения элементов электронных схем, что повысит надежность работы оборудования.

### Литература

1. Муха Ю.П. Исследование давления ударно-акустической волны электрического взрыва кольцевой фольги в конденсированной среде / Ю.П. Муха, А.Л. Суркаев, М.М. Кумыш, В.И. Усачев// Известия ВолгГТУ. Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь». ВолгГТУ. - № 6. - Волгоград, 2012. г. С. 69-74.
2. Физика высоких плотностей энергии / Под ред. П. Калдинова, Г. Кнопфеля. М.:Мир, 1974.
3. Ударные волны и экстремальные состояния вещества / Под ред. В.Е. Фортова, Л.В. Альтшулера, Р.Ф. Трунина, А.И. Фунтикова. М.: Наука, 2000.

### References

1. Muxa Yu.P. Issledovanie davleniya udarno-akusticheskoy volny' e'lektricheskogo vzry'va kol'cevoj fol'gi v kondensirovannoy srede / Yu.P. Muxa, A.L. Surkaev, M.M. Kумыsh, V.I. Usachev// Izvestiya VolgGTU. Seriya «E'lektronika, izmeritel'naya texnika, radiotexnika i svyaz'». VolgGTU. - № 6. - Volgograd, 2012. g. С. 69-74.
2. Fizika vy'sokix plotnostej e'nergii / Pod red. P. Kaldirova, G. Knopfelya. M.:Mir, 1974.
3. Udarnye volny' i e'kstremal'ny'e sostoyaniya veshhestva / Pod red. V.E. Fortova, L.B. Al'tshulera, R.F. Trunina, A.I. Funtikova. M.: Nauka, 2000.

Рецензія/Peer review : 11.1.2017 р.

Надрукована/Printed :27.2.2017 р.

Стаття рецензована редакційною колегією