

Разработка и исследование генератора наносекундных импульсов для электроэрозионной микрообработки

*В. В. Любимов^а, А. И. Курочкин^б, В. М. Волгин^а, Р. В. Садовников^б

^аТульский государственный университет,
г. Тула, 300012, Россия, *e-mail: lvv@tsu.tula.ru

^бАО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения», г. Тула, 300034, Россия

Описано создание генератора наносекундных импульсов напряжения для микроэлектроэрозионной обработки. В основе генератора заложено использование полумостовой схемы в оконечном каскаде и RC-цепи в схеме управления для формирования рабочего импульса напряжения. Выполнено компьютерное моделирование работы генератора и проведен эксперимент по осуществлению процесса эрозионной микрообработки.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, микрообработка, генератор импульсов, источник питания, принципиальная схема, длительность импульса.

УДК 621.9.048

DOI: 10.5281/zenodo.1345712

ВВЕДЕНИЕ

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) является одним из эффективных методов обработки в машиностроении и приборостроении [1–3]. Миниатюризация изделий, возрастание требований к точности и качеству поверхностей привели к развитию микроэлектроэрозионной обработки (МЭЭО) [4]. МЭЭО базируется на принципах традиционной электроэрозионной обработки, но отличается от нее параметрами рабочих импульсов: при МЭЭО используются импульсы со значительно меньшей энергией (в основном за счет уменьшения длительности импульсов напряжения).

В настоящее время доказано, что для получения наилучшего соотношения качества обработанной поверхности и производительности обработки наиболее эффективным методом является уменьшение длительности импульса, а не его амплитуды [5]. Выполнены исследования по моделированию процесса образования электроэрозионных лунок для возможной оценки эффективности разрушения материала, в том числе в условиях ультракоротких импульсов напряжения [6]. В связи с этим разработка генераторов ультракоротких импульсов для МЭЭО в настоящее время является актуальной задачей.

Для генерации ультракоротких импульсов при МЭЭО применяются генераторы импульсов различной конструкции. Наибольшее распространение получили генераторы импульсов релаксационного (RC) типа (рис. 1).

Их широкое распространение обусловлено простотой конструкции и возможностью достаточно просто генерировать импульсы длительностью порядка 10 нс. Однако релаксационным генераторам присущ ряд недостатков. Такие генераторы не могут производить импульсы с

высокой частотой, так как для зарядки конденсатора в RC-цепи требуется значительное время. Конструкция RC-генератора обуславливает снижение энергии импульса при уменьшении его длительности, что негативно сказывается на производительности обработки – данная проблема особенно актуальна при обработке импульсами длительностью порядка 10 нс. Также конструкция RC-генератора не позволяет контролировать скважность импульсов, что может привести к снижению качества обработанной поверхности, вплоть до порчи электродов (особенно в случае микрообработки) [7].

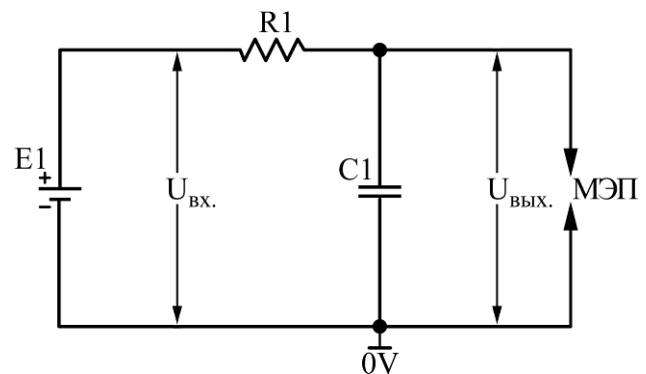


Рис. 1. Схема генератора импульсов релаксационного типа: E1 – источник питания; R1 – резистор; C1 – конденсатор; МЭП – межэлектродный промежуток.

Другим типом генераторов импульсов напряжения, которые применяются для производства ультракоротких импульсов, являются импульсные генераторы транзисторного типа. Данный тип генератора является наиболее распространенным при традиционной ЭЭО, однако при МЭЭО применяется значительно реже.

В генераторах данного типа формирование импульса напряжения происходит путем открытия/закрытия электронного ключа. В отличие от генераторов релаксационного типа для этого не

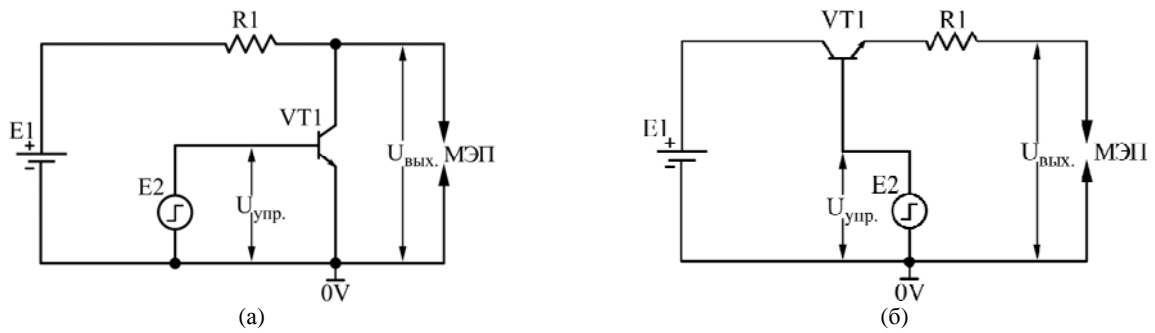


Рис. 2. Схемы транзисторных генераторов импульсов: (а) – с последовательным включением ключа; (б) – с параллельным включением ключа; E1 – источник питания; E2 – задающий генератор импульсов; R1 – токоограничивающий резистор; VT1 – электронный ключ; МЭП – межэлектродный промежуток.

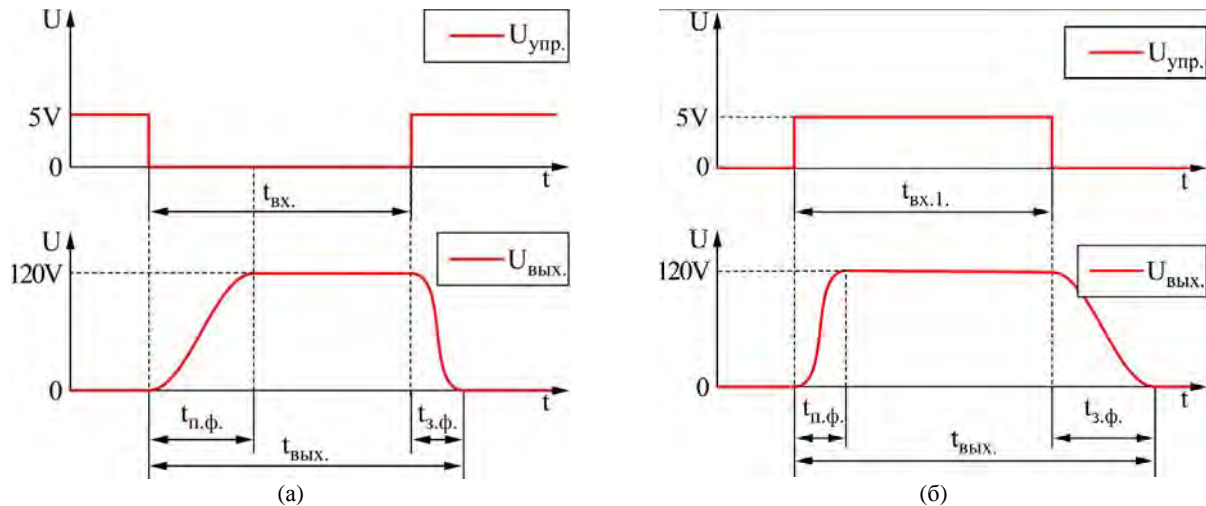


Рис. 3. Форма рабочих и управляющих импульсов транзисторных генераторов с последовательным (а) и параллельным включением ключа относительно МЭП: $U_{упр}$ – форма импульса управляющего напряжения; $U_{вых}$ – форма импульса напряжения на МЭП; $t_{вх.}$ – длительность управляющего импульса; $t_{вых.}$ – длительность импульса на МЭП; $t_{п.ф.}$ – длительность переднего фронта; $t_{з.ф.}$ – длительность заднего фронта импульса.

требуется заряжать конденсатор, поэтому такие генераторы позволяют производить импульсы с высокой частотой и регулировать их скважность в широком диапазоне. Конструкция данных генераторов импульсов позволяет формировать короткие импульсы с большой энергией [7].

Наибольшее распространение получили транзисторные генераторы импульсов двух типов – с последовательным и параллельным включением электронного ключа относительно МЭП [8].

При последовательном включении (рис. 2а) напряжение на МЭП ($U_{вых.}$) подается при открытии электронного ключа. В данном случае передний фронт рабочего импульса формируется при открытии ключа, а задний – при его закрытии. При параллельном включении происходит инверсия рабочего импульса относительно управляющего, и передний фронт импульса формируется при закрытии ключа, а задний – при его открытии.

Биполярные и полевые транзисторы, которые обычно используются в качестве электронных ключей, открываются быстрее, чем закрываются, поэтому в случае последовательного включения ключа длительность переднего фронта ($t_{п.ф.}$)

рабочего импульса напряжения меньше, чем длительность заднего фронта ($t_{з.ф.}$) (рис. 2а). В случае параллельного включения длительность переднего фронта импульса напряжения больше, чем заднего, но при этом общая длительность рабочего импульса ($t_{вых.}$) меньше, чем при последовательном включении (рис. 2б).

Таким образом, последовательная схема обеспечивает более крутой передний фронт импульса, а параллельная схема позволяет получать меньшую длительность импульса.

Электронные ключи из открытого состояния переходят в закрытое с некоторой задержкой. Данный параметр называется задержкой выключения. Длительность данной задержки для современных электронных ключей составляет от одного до нескольких десятков наносекунд. Например, суммарная длительность переднего фронта, задержки выключения и заднего фронта для MOSFET-транзистора IRFH5025PbF составляет примерно 30 нс [9]. В связи с этим генерация ультракоротких импульсов длительностью порядка 10 нс с помощью транзисторных генераторов является достаточно сложной задачей (рис. 3).

В настоящее время созданы генераторы, обеспечивающие формирование импульсов длительностью 30–100 нс [10–13].

Таким образом, создание транзисторных генераторов импульсов для микроэлектроэрозионной обработки с длительностью импульса менее 30 нс является актуальной задачей.

СИНТЕЗ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ НАНОИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ МЭЭО

Цель исследования – разработка транзисторного генератора для МЭЭО, обеспечивающего формирование импульсов длительностью порядка 10 нс.

Так как суммарное время открытия и закрытия современных электронных ключей превышает 10 нс, применение существующих схемных решений для создания генератора импульсов длительностью 10 нс невозможно.

Для уменьшения длительности рабочего импульса была разработана схема транзисторного генератора импульса для МЭЭО с полумостовой схемой в оконечном каскаде. Данная схема содержит два электронных ключа, один из которых включен последовательно относительно МЭП, а второй – параллельно (рис. 4).

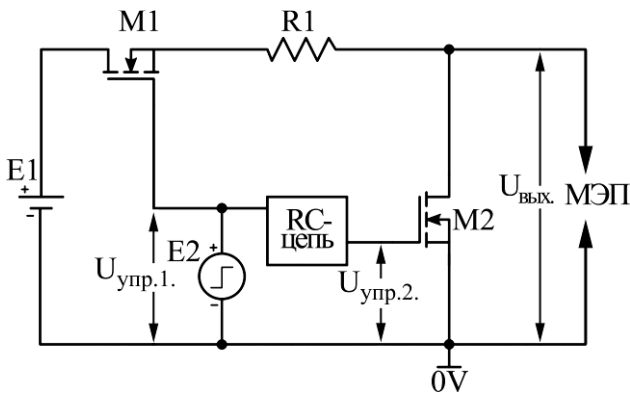


Рис. 4. Транзисторный генератор с полумостовой схемой включения ключей: E1 – источник питания; E2 – задающий генератор импульсов; M1, M2 – электронные ключи (MOSFET-транзисторы); R1 – токоограничивающий резистор; МЭП – межэлектродный промежуток.

Ключ M1 включен последовательно относительно МЭП, при его открытии на МЭП подается напряжение от источника питания E1 ($U_{\text{вых.}}$). Ключ M2 включен параллельно МЭП, и при его открытии напряжение на МЭП становится равным 0 В. Ключ M1 открывается передним фронтом импульса от задающего генератора, который подается на ключ M1 непосредственно ($U_{\text{упр.1}}$). Ключ M2 также открывается передним фронтом того же импульса, который подается на ключ M1 через схему задержки, представляющую собой RC-цепь ($U_{\text{упр.2}}$). В результате на МЭП формиру-

ется импульс напряжения, длительность которого определяется постоянной времени (Δt) RC-цепи (рис. 5).

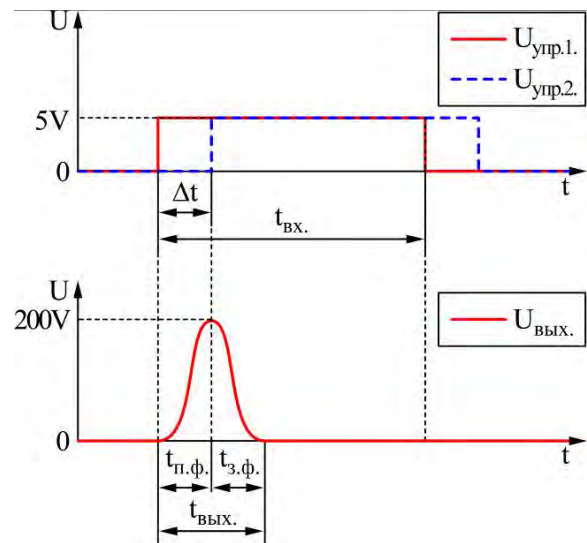


Рис. 5. Рабочий и управляющий импульсы генератора с полумостовой схемой: $U_{\text{вых.}}$ – импульс напряжения на МЭП (рабочий импульс); $U_{\text{упр.1}}$ – управляющий импульс; $U_{\text{упр.2}}$ – управляющий импульс после прохождения через схему задержки; $t_{\text{вх.}}$ – длительность управляющего импульса; $t_{\text{вых.}}$ – длительность рабочего импульса; Δt – величина задержки (постоянная времени RC-цепи); $t_{\text{п.ф.}}$ – длительность переднего фронта рабочего импульса; $t_{\text{з.ф.}}$ – длительность заднего фронта рабочего импульса.

Так как в полумостовой схеме передний и задний фронты рабочего импульса формируются при открытии электронных ключей M1 и M2, применение данной схемы позволяет избежать влияния задержки выключения на длительность рабочего импульса и тем самым сократить его длительность.

Структурно генератор состоит из двух основных систем – системы формирования импульсов и оконечного каскада (рис. 6).

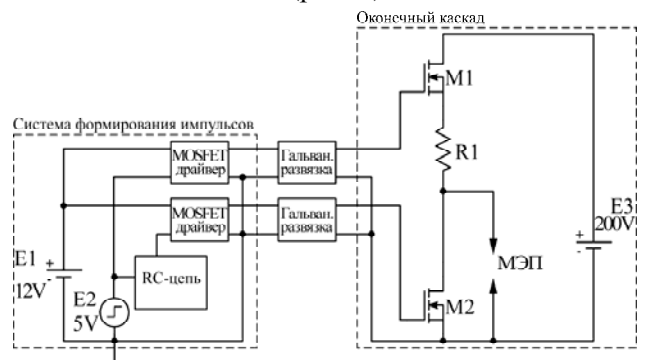


Рис. 6. Структурная схема генератора наносекундных импульсов: M1, M2 – MOSFET-транзисторы оконечного каскада; R1 – токоограничивающий резистор; E1 – источник питания драйверов; E2 – задающий генератор импульсов; E3 – источник питания оконечного каскада; МЭП – межэлектродный промежуток.

Оконечный каскад состоит из двух MOSFET-транзисторов M1 и M2, включенных по полумостовой схеме, и токоограничивающего

Технические характеристики генератора ультракоротких импульсов для МЭЭО

№	Параметры	Значение
1.	Амплитуда рабочих импульсов, В	100–250
2.	Частота рабочих импульсов, кГц	1–3
3.	Длительность рабочих импульсов, нс	10–100000

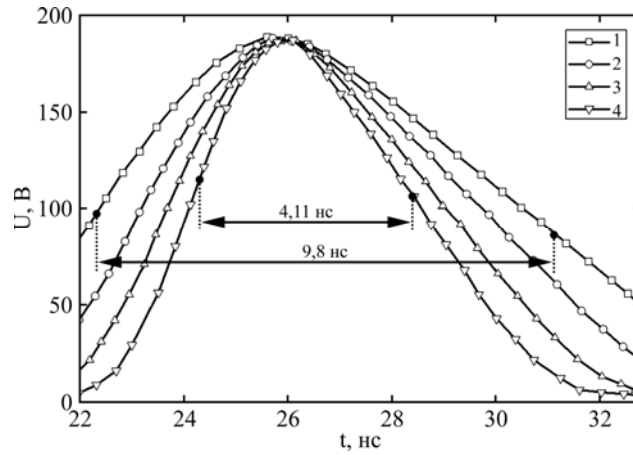


Рис. 7. Импульсы напряжения на выходе генератора при различной емкости нагрузки C_n :
 1 – $C_n = 0$ пф; 2 – $C_n = 100$ пф; 3 – $C_n = 250$ пф; 4 – $C_n = 500$ пф.

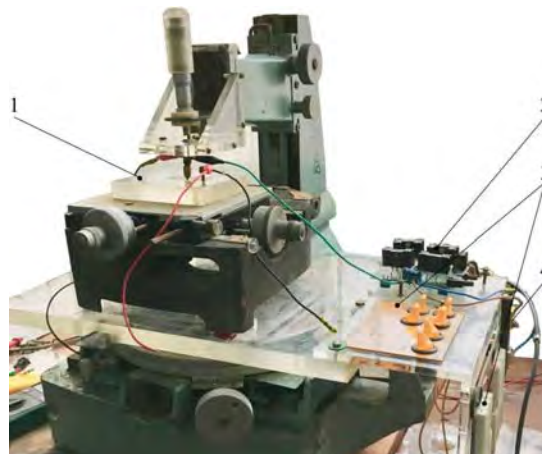


Рис. 8. Экспериментальная установка: 1 – эрозионная ячейка; 2 – генератор импульсов; 3 – стенд нагрузки; 4 – измерительный шунт.

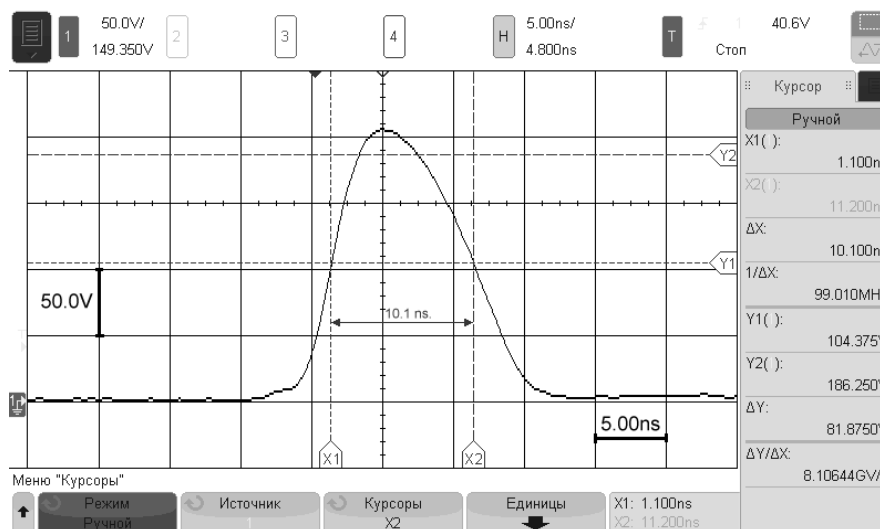


Рис. 9. Импульс напряжения на выходе генератора при испытании на экспериментальной электроэрозионной ячейке: амплитуда импульса – 206 В, длительность импульса – 10,1 нс.

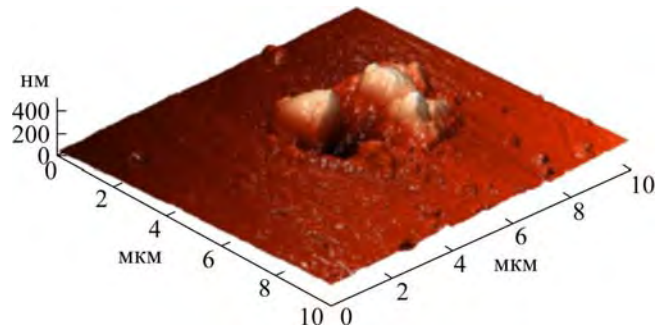


Рис. 10. Изображение единичной электроэрозионной лунки, полученной на экспериментальной электроэрозионной ячейке: амплитуда импульса напряжения – 206 В, длительность импульса – 10,1 нс.

резистора R1. Питание оконечного каскада осуществляется от источника постоянного напряжения 200 В.

Система формирования импульсов состоит из задающего генератора импульсов E2, который формирует прямоугольные импульсы амплитудой 5 В и частотой 1–3 кГц. Импульсы напряжения от задающего генератора поступают на драйверы электронных ключей, после чего подаются на оконечный каскад. Питание драйверов осуществляется от источника постоянного тока с напряжением 12 В.

Система формирования импульсов и оконечный каскад разделены схемой гальванической развязки.

Технические характеристики разработанного генератора представлены в таблице.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГЕНЕРАТОРА НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Компьютерное моделирование

Произведена проверка работоспособности предложенной схемы с помощью компьютерного моделирования. Для моделирования использовалась технология SPICE-моделирования.

Моделирование включало проверку функционирования схемы оконечного каскада и подбор значений элементов RC-цепи для получения минимальной длительности импульса.

В качестве нагрузки оконечного каскада при моделировании использовался резистор номиналом 10–100 Ом. Для моделирования влияния распределенной емкости конструкции, которая всегда имеет место в реальном генераторе, параллельно резистору включался конденсатор емкостью 100–500 пф.

В результате моделирования установлено, что изменение сопротивления нагрузки оконечного каскада (R_n) не оказывает влияния на характеристики рабочего импульса, в то время как увеличение емкости нагрузки (C_n) приводит к увеличению длительности переднего и заднего фронтов импульсов (рис. 7). Минимальная длитель-

ность импульса получена при емкости нагрузки 0 пф и составляла 4 нс.

Экспериментальное исследование

На основе разработанной схемы создан опытный образец генератора и проведены его испытания на экспериментальной электроэрозионной установке (рис. 8).

В ходе исследования в составе экспериментальной установки на выходе генератора были зафиксированы импульсы длительностью 10,8 нс. Осциллограмма полученного импульса представлена на рис. 9.

В качестве анода использовался образец из стали 25X17H2Б-Ш. В результате экспериментов получены единичные лунки с использованием наносекундных импульсов длительностью 10,1 нс. Измерение геометрических лунок производилось с помощью сканирующего зондового микроскопа SOLVER P47-SHV-MDT в контактном режиме. На рис. 10 приведено изображение единичной лунки.

Радиус сформированной электроэрозионной лунки составляет примерно 2,5 мкм, а ее глубина приблизительно равна 150 нм. То есть размеры лунки, полученной при использовании импульсов наносекундной длительности, почти на порядок меньше, чем размеры лунок, получаемых при использовании импульсов микросекундной длительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ существующих схем генераторов ультракоротких импульсов для МЭЭО, определены их характерные особенности и недостатки. На основе данного анализа разработана принципиальная электрическая схема генератора наносекундных импульсов для МЭЭО, отличительной особенностью которой является использование полумостовой схемы в оконечном каскаде и RC-цепи в системе формирования импульсов.

Проведено компьютерное моделирование работы генератора импульсов, которое показало,

что предложенная схема генератора позволяет формировать рабочие импульсы напряжения длительностью 10 нс и менее. Разработан и создан экспериментальный образец предложенного генератора импульсов и проведены его исследования на экспериментальной электроэрозионной ячейке. В ходе экспериментов удалось получить рабочий импульс длительностью 10,1 нс. Получены единичные лунки на поверхности электрода.

Результаты исследования опубликованы при финансовой поддержке ТулГУ в рамках научного проекта № 8706.

ЛИТЕРАТУРА

1. El-Hofy H.A.G. *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. NY: McGraw Hill, 2005. 253 p.
2. Kibra G., Bhattacharyya B., Davim J.P. (eds) *Non-traditional Micromachining Processes: Fundamentals and Applications*. Berlin: Springer, 2017. 422 p.
3. Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P. *Procedia CIRP*. 2013, **6**, 13–26.
4. Fassi I., Shipley D. *Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications*. Berlin: Springer, 2014. 296 p.
5. Matsuhara Y., Obara H. *J Elec Mach Technol*. 2004, **28**(90), 19–22.
6. Feng X., Wong Y.S., Hong G.S. *Mach Sci Technol*. 2016, **20**(1), 79–98.
7. Masuzawa T., Sata T., Kinoshita N. *J JSEME*. 1971, **5**(9), 35–52.
8. Лившиц А.Л., Отто М.А. *Импульсная электротехника*. М.: Энергоатомиздат, 1983. 352 с.
9. IRFH5025PbF Product Datasheet <https://www.infineon.com/dgdl/irfh5025pbf.pdf?fileId=5546d462533600a40153561acde51ea0>
10. He G., Zhao W., Guo Y., Wang Z. *Elec Disch Mach*. 1999, **4**, 11–13.
11. Han F., Chen L., Yu D., Zhou X. *Int J Adv Manuf Technol*. 2007, **33**, 474–479.
12. Yan M.-T., Liu Y.-T. *Int J Mach Tool Manu*. 2009, **49**(10), 793–796.
13. Kao C.C., Shih A.J. *Int J Mach Tool Manu*. 2006, **46**(15), 1996–2008.

Поступила 25.04.18

Summary

The paper deals with the development of the voltage nanosecond pulse generator for electrical discharge micromachining. The scheme of the generator is based on usage of half-bridge circuits in the output cascade and the RC-circuit in the control circuit for the formation of the working voltage pulse. The computer simulation of the generator and an experiment on the implementation of the electrical discharge micromachining were done.

Keywords: electrical discharge machining, micromachining, pulse generator, power source, circuit diagram, pulse duration.