

УДК 669.71:621.778

## АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТИМУЛИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ\*

**Кузнецов В.А.**, к.т.н., доцент кафедры электротехники, электроэнергетики  
и промышленной электроники (vladimir.kuznezoff@yandex.ru)

**Громов В.Е.**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин  
им. проф. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

**Кузнецова Е.С.**, к.т.н., доцент кафедры электротехники, электроэнергетики  
и промышленной электроники (kuzlena00@yandex.ru)

**Гагарин А.Ю.**, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин  
им. проф. В.М. Финкеля (s.nk@mail.ru)

**Косинов Д.А.**, к.т.н., старший научный сотрудник управления  
научных исследований (УНИ) (kosinov.dima@rambler.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Для создания современного механического оборудования требуются новые конструкционные материалы с высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками, которых нельзя достичь традиционными методами. Перспективы развития технологий формоизменения сталей во многом связаны с использованием внешних энергетических воздействий, в частности, мощных токовых импульсов, формируемых генераторами мощных однополярных импульсов тока амплитудой до 10 – 15 кА, частотой воспроизведения до 400 Гц и длительностью импульса до 100 мкс. Недостатками таких генераторов, препятствующими их широкому применению в промышленности, являются низкий КПД и значительное потребление электроэнергии из сети переменного тока, а также невозможность регулирования энергосиловых параметров. В работе приведено описание лишнего вышеуказанных недостатков генератора мощных однополярных импульсов, содержащего зарядное устройство, подключенное к силовым конденсаторам, и тиристорный ключ, разряжающий конденсаторы на низкоомную нагрузку. С целью снижения мощности, потребляемой из сети, в схему генератора введено устройство перезаряда на тиристоре, подключенном встречно-параллельно тиристорному ключу. Для реализации возможности регулирования амплитуды импульса и увеличения его мощности вместо нерегулируемого источника постоянного тока в зарядном устройстве используются два непереворачиваемых, включенных последовательно и однонаправленно тиристорных преобразователя, которые позволяют получать регулируемое напряжение на силовых конденсаторах. С целью оптимизации процесса заряда конденсаторов выполнена двухконтурная система подчиненного регулирования параметров генератора импульсов с внешним контуром регулирования напряжения и внутренним контуром регулирования тока заряда конденсаторов. Выполнена модель предложенного генератора в среде «Матлаб, Симулинк». Модель адекватна реальному генератору импульсов, используемому в СибГИУ для исследования электростимулированной пластической деформации металлов и сплавов. Разработанная модель позволила улучшить технические характеристики и режимы работы устройства. Преимуществом модернизированного генератора по сравнению с аналогами является значительное снижение мощности, потребляемой из сети, а также возможность регулирования напряжения заряда конденсаторов до 600 В в диапазоне частот воспроизведения импульса до 400 Гц. Генератор можно использовать в промышленных целях, в частности, в прокатном производстве для волочения проволоки из труднодеформируемых сталей.

**Ключевые слова:** генератор импульсов, зарядное устройство, устройство перезаряда, импульс тока, математическое моделирование, переходные процессы.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-157-163

Интерес к изучению особенностей влияния импульсного электрического тока (ИЭТ) высокой плотности на поведение и свойства металлических материалов обусловлен перспективностью их применения [1, 2]. Влияние импульсов электрического тока проявляется на разных структурных уровнях и благодаря своему разнообразию, универсальности и уникальным возможностям может быть использовано для модифика-

ции физико-механических свойств, стимулирования релаксационных процессов и снижения остаточных напряжений в элементах конструкций.

Впервые эффект влияния электронного воздействия (электропластический эффект (ЭПЭ)) на процесс деформации металла экспериментально был исследован и описан в работе [3]. Работы в этом направлении проводятся более 50 лет, но единого мнения о природе обнаруженного ЭПЭ у исследователей не существует [4 – 10]. Несмотря на большое количество экспери-

\* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 16-32-60048 мол\_а\_дк).

ментальных и теоретических исследований в связи с недостаточной определенностью физических механизмов воздействия ИЭТ на металлические материалы, а также существующей противоречивостью трактовок макроскопических эффектов дальнейшее изучение влияния ИЭТ на металлы и сплавы остается актуальной и важной научно-практической задачей.

Решение задач исследования механизмов развитой электростимулированной деформации и ее практического применения в обработке металлов давлением возможно при использовании источников мощных коротких токовых импульсов [11 – 15]. Такие источники (их принцип действия заключается в разряде предварительно заряженных конденсаторов на низкоомную нагрузку) используются и при изучении изменения физических свойств металлов при токовом воздействии [16 – 20]. Недостатками таких генераторов, препятствующими их широкому применению в промышленности, являются: низкий КПД и значительные затраты электроэнергии зарядного устройства в связи с наличием в цепи заряда конденсаторов токоограничивающего сопротивления  $R_3$ ; невозможность регулирования амплитуды силового импульса.

Целью настоящей работы являются создание элементов схемы генератора мощных токовых импульсов, устраняющих эти недостатки, а также способствующих снижению потребляемой из сети мощности, и внедрение генератора в технологическую линию при обработке металлов давлением.

Структурная схема генератора представлена на рис. 1, осциллограммы переходных процессов тока импульса, тока заряда силовых конденсаторов и напряжения на силовых конденсаторах – на рис. 2. После прохождения импульса напряжение на конденсаторах  $CB$  принимает отрицательное значение ( $-U_31$ ), равное  $(0,85 - 0,95)$  от первоначальной величины напряжения  $U_3$ . Перезаряд конденсаторов от  $-U_31$  до  $U_3$  происходит от источника постоянного тока с потреблением мощности из сети.

Для ограничения броска тока между выпрямительным мостом зарядного устройства и силовыми конденсаторами установлено токоограничивающее сопротивление  $R_3$ , на котором рассеивается значительная мощность (30 кВт при частоте воспроизведения импульсов 100 Гц).

С целью снижения мощности, потребляемой из сети, в схему генератора импульсов введен узел перезаряда, состоящий из последовательно соединенных токоограничивающей индуктивности  $L_2$  и тиристора  $VS_4$ , подключенных встречно-параллельно с тиристором  $VS_3$ . В момент времени, когда после прохождения силового импульса ток становится равным нулю, в измерительном трансформаторе  $M$  формируются импульсы разной полярности, величина которых пропорциональна производной силового импульса  $di/dt$ . Дiode  $VD_2$  блокирует отрицательную полуволну, а положительный сигнал усиливается в усилителе  $G_4$ , ограничивается до необходимой величины и подается на управляющий электрод

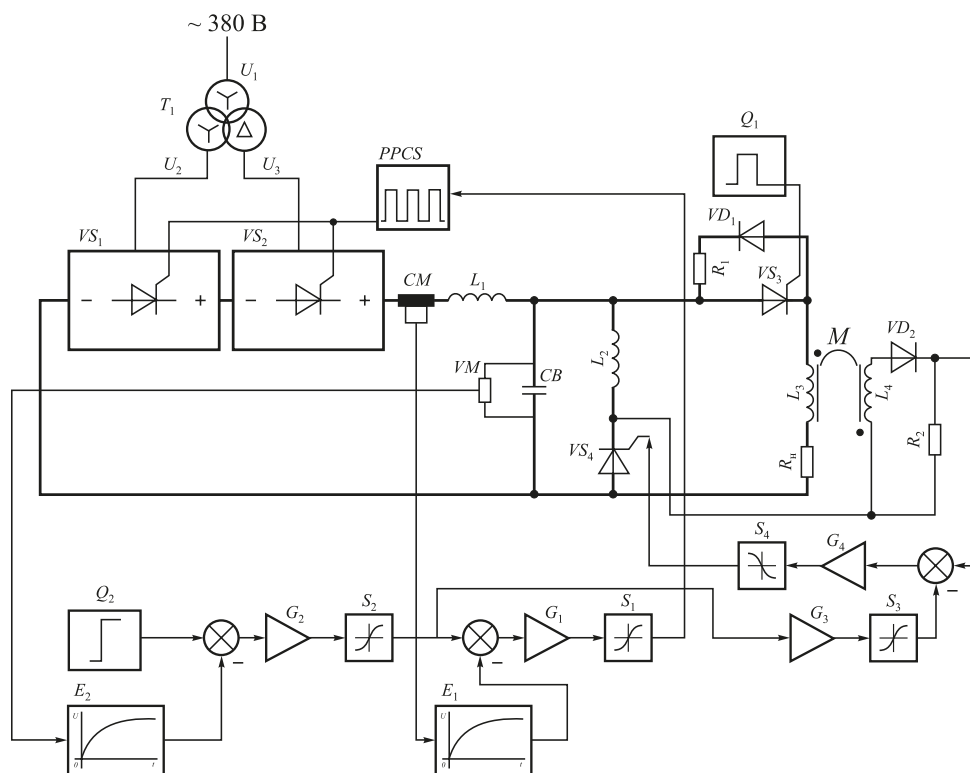


Рис. 1. Структурная схема генератора

Fig. 1. Block diagram of the generator

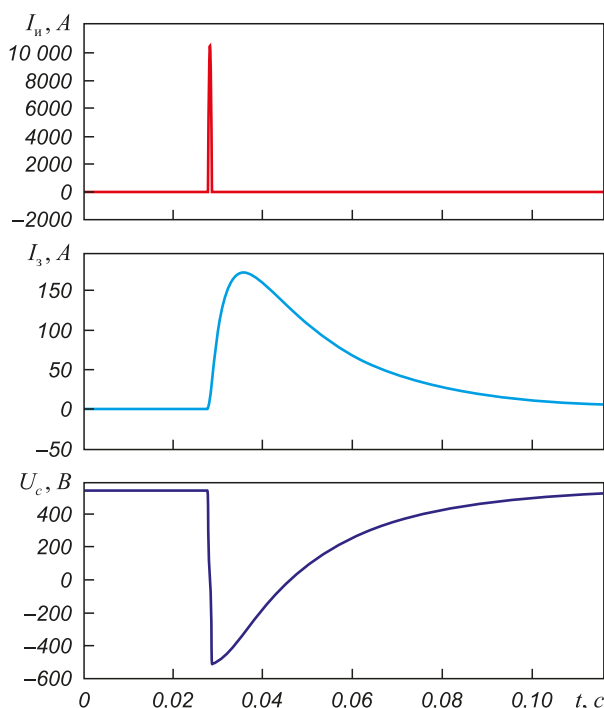


Рис. 2. Осциллограмма переходных процессов генератора мощных импульсов:

$I_n$  – ток импульсов;  $I_z$  – ток заряда;  $U_c$  – напряжение на конденсаторах

Fig. 2. Oscillogram of transient processes of powerful pulse generator:  $I_n$  – pulse current;  $I_z$  – charge current;  $U_c$  – capacitor voltage

тиристора  $VS_4$ . Последний открывается и конденсаторы  $CB$  перезаряжаются по цепи тиристор  $VS_4$  – индуктивность  $L_2$  до положительного значения напряжения  $(0,8 \div 0,9)U_c$ . При этом зарядное устройство осуществляет только дозаряд конденсаторов до  $U_3$ . Таким образом, применение устройства перезаряда значительно снижает мощность, потребляемую из сети.

Переходные процессы импульса тока и напряжения перезаряда с использованием тиристора  $VS_4$  представлены на рис. 3.

Для дальнейшего снижения мощности зарядного устройства и возможности регулирования величины напряжения заряда (амплитуды импульса) вместо нерегулируемого выпрямителя на диодах в схему введены управляемые тиристорные преобразователи  $VS_1$ ,  $VS_2$ , соединенные последовательно, при этом один из преобразователей получает питание от обмотки трансформатора  $T_1$ , соединенной по схеме «звезда» ( $U_2$ ), а другой – по схеме «треугольник» ( $U_3$ ). Такая схема соединений, во-первых, повышает выпрямленное напряжение (соответственно, и величину силового импульса), а во-вторых – снижает инерционность преобразователя (число пульсаций  $m$  за период питающего напряжения увеличивается до 12, а длительность пульса снижается до 1,6 мс). При использовании вышеупомянутого источника питания генератор способен генерировать импульс с максимальной частотой воспроизведения до 400 Гц.

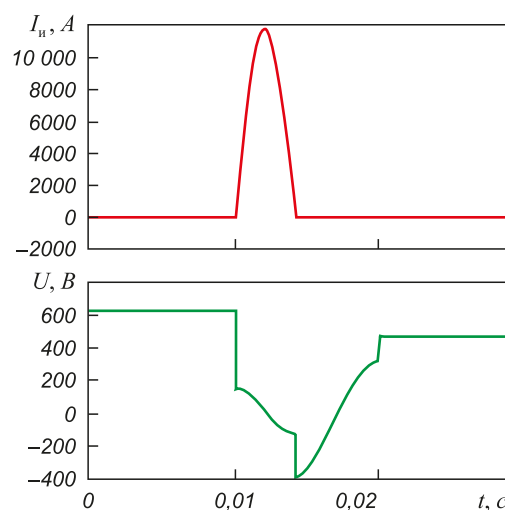


Рис. 3. Параметры импульса тока и напряжения на конденсаторах с устройством перезаряда

Fig. 3. Parameters of capacitors' current pulse and voltage with recharge unit

Использование тиристорных преобразователей позволило вывести из схемы зарядного устройства токоограничивающий резистор  $R_3$ , что также повысило КПД и снизило мощность, потребляемую из сети переменного тока. Математическая модель такого генератора представлена на рис. 4.

Для регулирования величины амплитуды импульса реализована двухконтурная система подчиненного регулирования напряжения (САРН). Внутренний контур системы автоматического регулирования организован как контур регулирования тока заряда, а внешний – как контур регулирования напряжения заряда конденсаторов. Контур регулирования тока состоит из регулятора тока  $G_1$  с блоком ограничения  $S_1$ , тиристорных преобразователей  $VS_1$ ,  $VS_2$ , представляющих из себя инерционные звенья с малой (4 мс) постоянной времени, и объекта регулирования – силовых конденсаторов  $CB$ . Для устойчивой работы контура в схему введена дополнительная индуктивность  $L_1$ . Активные сопротивления тиристорных преобразователей и ошиновки, а также индуктивность силовых конденсаторов учтены в блоке силовых конденсаторов  $CB$ . Отрицательная обратная связь по току снимается с шунта  $CM$  и усиливается быстродействующим усилителем (датчиком тока)  $E_1$ . Контур регулирования напряжения заряда конденсаторов содержит регулятор напряжения  $G_2$  с регулируемым блоком ограничения  $S_2$  и оптимизированный контур тока. Обратная связь по напряжению состоит из делителя и датчика напряжения  $E_2$ . Ограничение максимального тока заряда осуществляется за счет блока ограничения регулятора напряжения  $S_2$ , блок ограничения регулятора тока  $S_1$  позволяет ограничивать минимальное и максимальное значения угла регулирования тиристорных преобразователей. Задание на напряжение может быть подано либо вручную (от блока  $Q_1$ ),

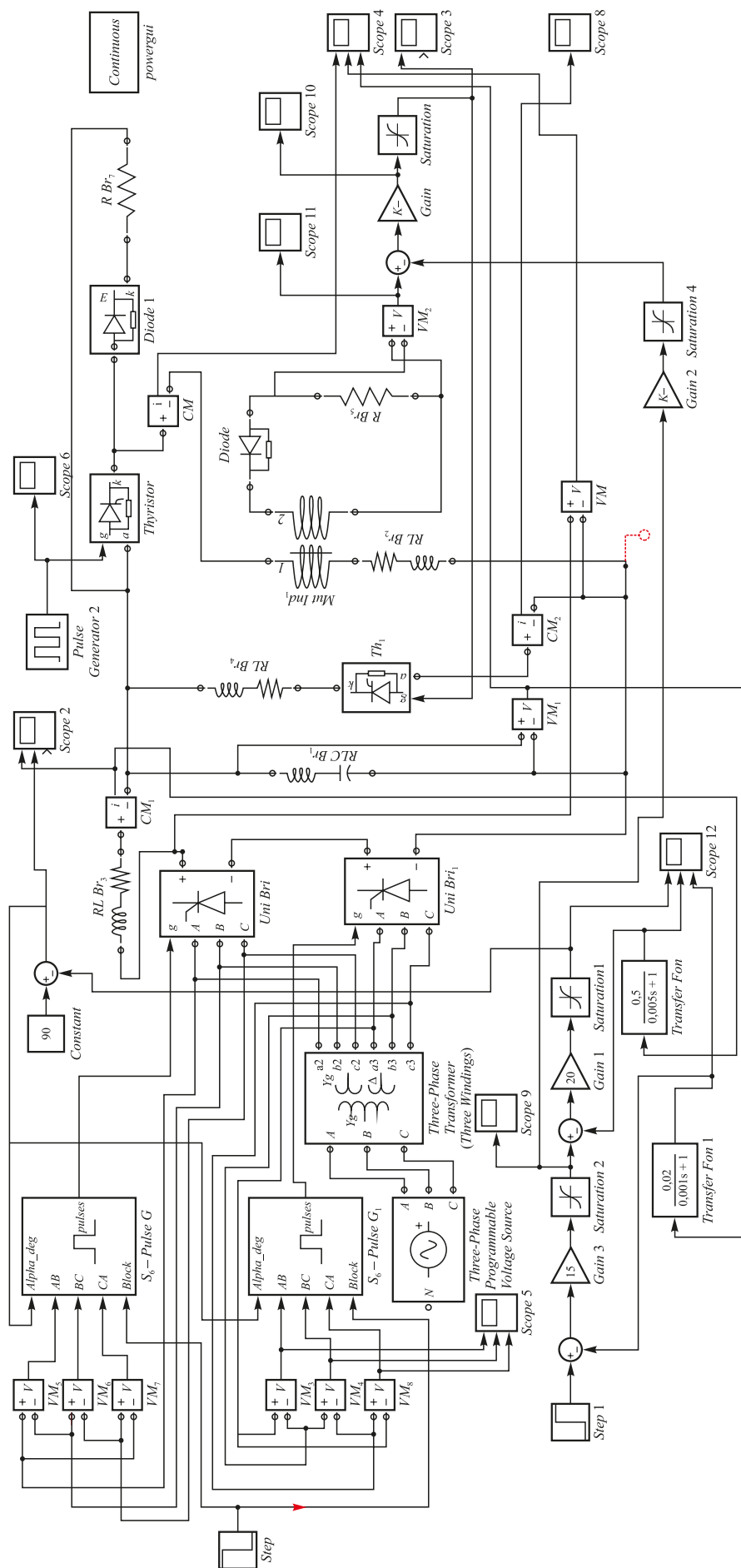


Рис. 4. Математическая модель модернизированного генератора

Fig. 4. Mathematical model of the modernized generator

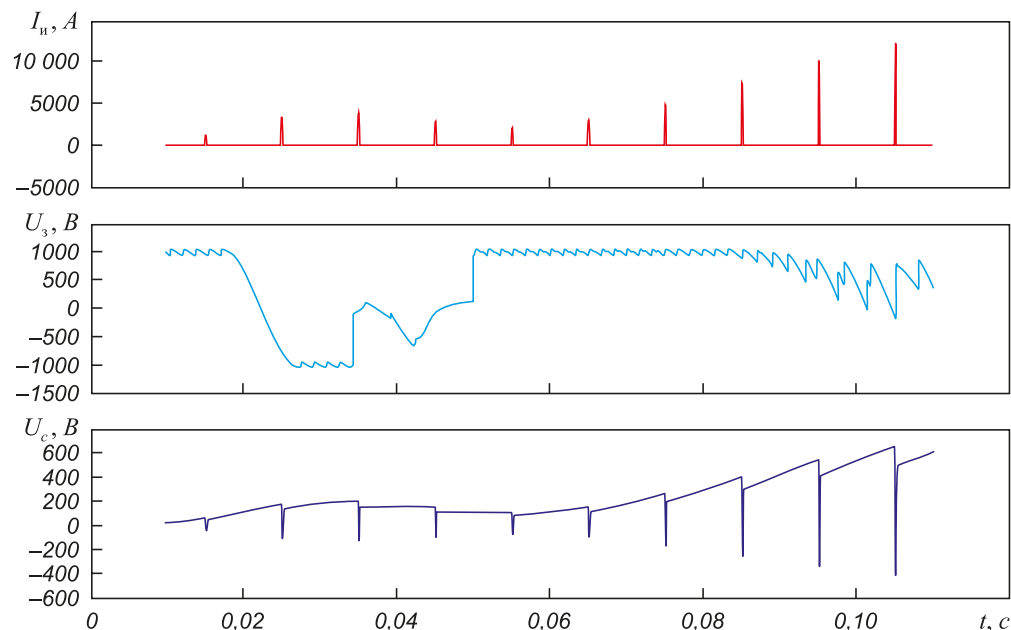


Рис. 5. Переходные процессы при скачкообразном изменении задания на напряжение заряда конденсаторов:

$I_n$  – ток импульсов;  $U_3$  – напряжение заряда;  $U_c$  – напряжение на конденсаторах

Fig. 5. Transient processes in stepwise change of voltage adjustment of capacitors charge:

$I_n$  – pulse current;  $U_3$  – charge voltage;  $U_c$  – capacitor voltage

либо от сигнала технологического программируемого контроллера.

При необходимости быстрого снижения напряжения система регулирования формирует задание на отрицательную величину тока «заряда» – разрядный ток. Однако в связи с тем, что тиристорные преобразователи непереворачиваемые, они могут снизить ток только до нулевого значения. В этом случае снижение напряжения на конденсаторах происходит исключительно за счет активных потерь и имеет длительный характер. С целью повышения быстродействия системы в схему введено устройство, блокирующее на время, необходимое для снижения напряжения на конденсаторах, работу устройства перезаряда путем блокировки управляющих импульсов на тиристор  $VS_4$ . Устройство блокировки содержит усилитель  $G_3$  с блоком ограничения  $S_3$ . При отрицательном задании на ток устройство формирует сигнал, блокирующий работу компаратора  $G_4$  в системе формирования управляющих импульсов, на тиристор  $VS_4$  перезаряда.

Математическая модель модернизированного генератора, выполненная в среде «Матлаб, Симулинк», с устройством перезаряда, тиристорным управляемым зарядным устройством и САРН представлена на рис. 4, а осциллограммы переходных процессов при работе модернизированного генератора в режиме скачкообразного изменения задания на напряжение до 600 В – на рис. 5. Мощность, потребляемая модернизированным генератором из сети в статическом режиме при частоте воспроизведения импульсов 100 Гц, снизилась в пять раз (с 30 до 5,5 кВт).

**Выводы.** Внедрение в схему генератора импульсов устройства перезаряда и блока последовательно соединенных тиристорных преобразователей позволило снизить мощность, потребляемую из питающей сети, а также дало возможность плавно регулировать амплитуду силового импульса с высоким быстродействием (не менее 60 мс) и широким диапазоном регулирования до 600 В. Это значительно расширяет возможности использования устройства в промышленности. Выполненная модель адекватна реальной установке, что дает возможность применять ее для уточнения параметров используемых элементов и системы подчиненного регулирования с целью оптимизации режимов работы (в частности, переходных процессов) и повышения надежности эксплуатации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И. Влияние импульсного электрического тока высокой плотности на прочность металлических материалов и напряженно-деформированное состояние элементов конструкций. – Киев: Наукова думка, 2014. – 277 с.
2. Стрижало В.А., Новогрудский Л.С., Воробьев Е.В. Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. – Киев: изд. ин-та проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2008. – 504 с.
3. Троицкий О.А., Лихтман В.И. Об анизотропии действия электронного и  $\alpha$ -облучения на процесс деформации монокристаллов цинка в хрупком состоянии // ДАН СССР. Техническая физика. 1963. Т. 148. № 2. С. 332 – 334.
4. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. A study of the electroplastic effect in metals // Scripta Metallurgica. 1978. Vol. 12. No. 11. P. 1063 – 1068.



5. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. A study of the electroplastic effect in metals // *Scripta Metallurgica*. 1979. Vol. 13. No. 4. P. 277 – 280.
6. Stepanov G., Babutsky A., Krushka L. Metals behavior under passage of impulse electric current // *J. Phys. IV France*. 2003. Vol. 110. P. 577 – 582.
7. Sprecher A.F., Mannan S.L., Conrad H. On mechanisms for the electroplastic effect in metals // *Acta Metallurgica*. 1986. Vol. 34. No. 7. P. 1145 – 1162.
8. Conrad H., Cuo Z., Sprecher A.F. Effect of an electric field on the recovery and recrystallization of Al and Cu // *Scripta Metallurgica*. 1989. Vol. 23. No. 6. P. 821 – 824.
9. Meyers M. Comments on “The electroplastic effect in Al” // *Scripta Metallurgica*. 1980. Vol. 14. No. 11. P. 1033 – 1034.
10. Varma S., Coruwell L. A reply to comments on the electroplastic effect in Al // *Scripta Metallurgica*. 1980. Vol. 14. No. 11. P. 1035 – 1036.
11. Кузнецов В.А., Громов В.Е., Перетяжко В.Н. Применение генератора мощных импульсов тока при электростимулированном волочении // *Промышленная энергетика*. 1986. № 10. С. 17 – 19.
12. Кузнецов В.А., Громов В.Е., Симаков В.П. и др. Генератор мощных однополярных импульсов тока // *Техническая электродинамика*. 1981. № 5. С. 46 – 49.
13. Применение физических полей для обработки металлов / Н.Н. Беклемишев, А.Е. Горский, Б.Н. Журкин и др. Вып. 4. – М.: изд. ЦНИИТЭИ приборостроения, 1981. – 55 с.
14. Беклемишев Н.Н. Установка для исследования процесса деформации проводящих материалов с учетом действия тока

- высокой плотности // *Заводская лаборатория*. 1984. Т. 50. № 9. С. 82 – 84.
15. Кузнецов В.А., Громов В.Е. Экономичный тиристорный генератор мощных импульсов тока // *Изв. вуз. Электромеханика*. 1986. № 6. С. 122 – 124.
16. Жмакин Ю.Д., Романов Д.А., Рыбнянец В.А. Экономичный способ регулирования электропотребления с применением генератора мощных токовых импульсов // *Промышленная энергетика*. 2012. № 4. С. 14 – 16.
17. Жмакин Ю.Д., Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Кузнецов В.А. Частотно-регулируемый генератор мощных токовых импульсов с обратной связью по амплитуде // *Промышленная энергетика*. 2011. № 1. С. 28 – 31.
18. Гагарин А.Ю., Романов Д.А., Жмакин Ю.Д. и др. Использование микропроцессора ПЛК 110-24.30.К-М для автоматизации электровзрывной установки ЭВУ60/10 // *Промышленная энергетика*. 2014. № 1. С. 38 – 40.
19. Гагарин А.Ю. Модернизация оборудования для изучения электростимулированной пластической деформации. – В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2016. С. 33 – 36.
20. Электромеханическое упрочнение металлов и сплавов / В.П. Багмутов, С.Н. Паршев, Н.Г. Дудкина и др. – Волгоград: изд. ВолГГТУ, 2016. – 462 с.

Поступила 22 ноября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 2, PP. 157–163.

## EQUIPMENT PROVISION OF ELECTROSTIMULATED METAL PROCESSING

V.A. Kuznetsov, V.E. Gromov, E.S. Kuznetsova, A.Yu. Gagarin, D.A. Kosinov

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

**Abstract.** The new construction materials with high technological and performance characteristics, which cannot be achieved by traditional methods, are required to create modern mechanical equipment. Prospects for the development of technologies of steels form changing are largely related to the use of external radiation, in particular powerful current pulses generated by the pulse generators of powerful unipolar current amplitude up to 10 – 15 kA, frequency reproduction up to 400 Hz and pulse duration of 100 microseconds. The disadvantages of such generators, preventing their widespread use in the industry are low efficiency and significant power consumption of the AC, as well as the inability to control the power parameters. The article presents description of the powerful generator of unipolar pulses having the charger connected to power capacitors and the thyristor switch, discharging the capacitors to the low ohm load. In order to reduce the main power, the charge exchange device on the base of thyristor connected antiparallelly in thyristor switch is introduced in the scheme. To realize the possibility of pulse amplitude control and increase in its capacity two irreversible thyristor transformers are used in charger instead of an unregulated direct current source. These thyristor transformers are switched on in series and in unidirectional way. They permit to obtain the regulated voltage at power capacitors. In order to optimize the capacitor charging process a two-circuit system of subordinate regulation of pulse generator parameters with external voltage control circuit and internal control – current capacitor charge. The model of the suggested generator is implemented in the “Matlab, Simulink” medium. This model is adequate to the real pulse generator used in SibSIU for investigation of electrostimulated plastic deformation of metals and alloys. The developed model permitted to improve the technical parameters and device operation regimes. The considerable mains power decreases as well as possibility of capacitor charge voltage control up to 600 V

in the range of pulse repetition frequency of 400 Hz are the advantages of updated generator in comparison with the analogues. The generator can be used in industry, in particular, at rolling production for hard deformed steel wire drawing.

**Keywords:** pulse generator, charger, recharging device, current pulse, mathematical modeling, transient processes.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-2-157-163

## REFERENCES

1. Stepanov G.V., Babutskii A.I. *Vliyaniye impul'snogo elektricheskogo toka vysokoi plotnosti na prochnost' metallicheskih materialov i napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye elementov konstruktivnykh* [Influence of pulsed current flow of high density on the durability of metal materials and intensively strain state of construction elements]. Kiev: Naukova dumka, 2014, 277 p. (In Russ.).
2. Strizhalo V.A., Novogradskii L.S., Vorob'ev E.V. *Prochnost' materialov pri kriogennykh temperaturakh s uchetom vozdeystviya elektromagnitnykh polei* [Material strength at cryogenic temperature including the influence of electromagnetic fields]. Kiev: izd. in-ta problem prochnosti im. G.S. Pisarenko NAN Ukrainy, 2008, 504 p. (In Russ.).
3. Troitskii O.A., Likhtman V.I. On anisotropy of the action of electric and  $\alpha$ -irradiation on the process of deformation of Zn-monocrystals in brittle state. *DAN SSSR. Tekhnicheskaya fizika*. 1963, vol. 148, no. 2, pp. 332–334. (In Russ.).
4. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. A study of the electroplastic effect in metals. *Scripta Metallurgica*. 1978, vol. 12, no. 11, pp. 1063–1068.
5. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. A study of the electroplastic effect in metals. *Scripta Metallurgica*. 1979, vol. 13, no. 4, pp. 277–280.
6. Stepanov G., Babutsky A., Krushka L. Metals behavior under passage of impulse electric current. *J. Phys. IV France*. 2003, vol. 110, pp. 577–582.

7. Sprecher A.F., Mannan S.L., Conrad H. On mechanisms for the electroplastic effect in metals. *Acta Metallurgica*. 1986, vol. 34, no. 7, pp. 1145–1162.
8. Conrad H., Cuo Z., Sprecher A.F. Effect of an electric field on the recovery and recrystallization of Al and Cu. *Scripta Metallurgica*. 1989, vol. 23, no. 6, pp. 821–824.
9. Meyers M. Comments on “The electroplastic effect in Al”. *Scripta Metallurgica*. 1980, vol. 14, no. 11, pp. 1033–1034.
10. Varma S., Coruwell L. A reply to comments on the electroplastic effect in Al. *Scripta Metallurgica*. 1980, vol. 14, no. 11, pp. 1035–1036.
11. Kuznetsov V.A., Gromov V.E., Peretyat'ko V.N. Use of the generator of high-power current impulses at electroinduced drawing. *Promyshlennaya energetika*. 1986, no. 10, pp. 17–19. (In Russ.).
12. Kuznetsov V.A., Gromov V.E., Simakov V.P., Semakin E.V., Anisimkin V.V. Generator of powerful unipolar current pulses. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*. 1981, no. 5, pp. 46–49. (In Russ.).
13. Beklemishev N.N., Gorskii A.E., Zhurkin B.N. etc. *Primenenie fizicheskikh polei dlya obrabotki metallov. Vyp. 4* [Usage of physical fields for the treatment of metals. Issue 4]. Moscow: izd. TsNIITEI priborostroeniya, 1981, 55 p. (In Russ.).
14. Beklemishev N.N. Unit for the research of deformation processes of conductive materials taking into account current effect of high density. *Zavodskaya laboratoriya*. 1984, vol. 50, no. 9, pp. 82–84. (In Russ.).
15. Kuznetsov V.A., Gromov V.E. Economic thyristor generator of powerful current impulses. *Izv. vuz. Elektromekhanika*. 1986, no. 6, pp. 122–124. (In Russ.).
16. Zhmakin Yu.D., Romanov D.A., Rybyanets V.A. Economic way to regulate electrical energy consumption with the usage of generator of powerful current impulses. *Promyshlennaya energetika*. 2012, no. 4, pp. 14–16. (In Russ.).
17. Zhmakin Yu.D., Zagulyaev D.V., Kononov S.V., Kuznetsov V.A. Frequency-controlled generator of powerful current impulses with the feed-back along the amplitude. *Promyshlennaya energetika*. 2011, no. 1, pp. 28–31. (In Russ.).
18. Gagarin A.Yu., Romanov D.A., Zhmakin Yu.D. etc. Usage of microprocessor PLK 110-24.30.K-M for the automatization of electro-explosive unit EVU (ЭВУ) 60/10. *Promyshlennaya energetika*. 2014, no. 1, pp. 38–40. (In Russ.).
19. Gagarin A.Yu. Modernization of equipment to study electric inspired plastic deformation. In: *Nauka i molodezh': problemy, poiski, resheniya: trudy Vserossiiskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Science and youth: issues, search, solutions: papers of All-Russian conference of students, postgraduates and young scientists]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2016, pp. 33–36. (In Russ.).
20. Bagmutov V.P., Parshev S.N., Dudkina N.G., Zakharov I.N., Denisevich D.S. *Elektromekhanicheskoe uprochnenie metallov i splavov* [Electromechanical hardening of metals and alloys]. Volgograd: izd. VolGTU, 2016, 462 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was performed within the framework of the grant of RFBR (no. 16-32-60048 мол\_а\_дк).

**Information about the authors:**

**V.A. Kuznetsov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Electrical Engineering, Electric Power and Industrial Electronics (vladimir.kuznezoff@yandex.ru)

**V.E. Gromov**, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel (gromov@physics.sibsiu.ru)

**E.S. Kuznetsova**, Cand. Sci. (Eng.), Assist Professor of the Chair of Electrical Engineering, Electric Power and Industrial Electronics (kuzlana00@yandex.ru)

**A.Yu. Gagarin**, Postgraduate of the Chair Science named after V.M. Finkel (s.nk@mail.ru)

**D.A. Kosinov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Department of Scientific Researches (kosinov.dima@rambler.ru)

Received November 22, 2016