

ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕВЕРСИВНОГО ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ*

Кузнецов В.А.¹, к.т.н., доцент кафедры электротехники, электропривода
и промышленной электроники (vladimir.kuznezoff@yandex.ru)

Полковников Г.Д.¹, магистрант кафедры электротехники, электропривода
и промышленной электроники (george42rus@gmail.com)

Громов В.Е.¹, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой естественнонаучных
дисциплин им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

Кузнецова Е.С.¹, к.т.н., доцент кафедры электротехники, электропривода
и промышленной электроники (kuzlena00@yandex.ru)

Перегудов О.А.², к.т.н., помощник ректора по молодежной политике (olegomgtu@mail.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Омский государственный технический университет
(644050, Россия, Омск, пр. Мира, 11)

Аннотация. В процессах обработки металлов давлением с использованием мощных импульсов тока возникает необходимость регулирования как частоты воспроизведения, так и амплитуды импульсов. Приведено описание генератора мощных импульсов тока с управляемым тиристорным преобразователем в качестве источника питания зарядного устройства для регулирования напряжения (амплитуды импульсов) заряда конденсаторов. Выявлены недостатки генераторов, связанные с броском тока в режимах заряда конденсаторов, что снижает качество питающей сети. Для уменьшения времени переходных процессов при снижении напряжения на конденсаторах рассмотрено применение в качестве источника питания реверсивного тиристорного преобразователя. Приведена структурная схема генератора, в состав которой входят реверсивный тиристорный преобразователь с раздельным управлением, силовой блок, устройство перезаряда конденсаторов, система автоматического регулирования параметров зарядного устройства, система управления процессом заряда конденсаторов. Представлен расчет параметров регуляторов системы автоматического регулирования. Для получения оптимальных переходных процессов используется типовая методика настройки регуляторов по модульному оптимуму. С целью снижения перерегулирования в момент появления возмущающих воздействий, которое может достигать 100 % и выше, в систему автоматического управления введено так называемое логическое устройство. Последнее блокирует управляющие импульсы на тиристорах преобразователя и одновременно снижает сигнал на выходе регулятора тока до нуля. Синтезирована симуляционная модель генератора мощных токовых импульсов в среде MatLab – Simulink. Выполнен анализ модели, приведены графики, поясняющие принцип работы устройства и переходные процессы при различных режимах работы. Использование генератора позволит регулировать амплитуду токовых импульсов с высоким быстродействием, получить достаточно качественные переходные процессы заряда (разряда) конденсаторов, что окажет благоприятное влияние на питающую сеть. Применение более качественных преобразователей позволит значительно увеличить частоту воспроизведения импульсов тока.

Ключевые слова: генератор мощных импульсов тока, зарядное устройство генератора, система автоматического регулирования параметров генератора, контуры регулирования напряжения на конденсаторах и тока заряда.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-12-964-971

ВВЕДЕНИЕ

Открытый более 50 лет назад электропластический эффект находит широкое применение для интенсификации процессов обработки труднодеформируемых сталей и сплавов в металлургической, автомобильной и машиностроительной отраслях промышленности [1 – 6]. Анализ работ китайских и американских исследователей последних лет показывает, что подведение в зону деформации мощных коротких токовых импульсов при обработке давлением (прокатке,

волочении, прессовании и т.д.) существенно изменяет структурно-фазовые состояния материала и обеспечивает снижение энергосиловых параметров процессов [7 – 25]. Для электростимулированных процессов обработки материалов необходимы источники мощных коротких токовых импульсов.

С появлением быстродействующих тиристоров большой мощности были разработаны генераторы мощных однополярных импульсов тока, принцип действия которых заключается в разряде предварительно заряженных конденсаторов на низкоомную нагрузку через тиристорный коммутатор. Наиболее важным узлом генератора является зарядное устройство, в общем

* Работа выполнена при поддержке государственного задания Минобрнауки РФ, проект 3.1283.2017/4.6.

случае содержащее неуправляемый или управляемый выпрямитель [26].

На рис. 1 приведен внешний вид генератора мощных импульсов тока со следующими параметрами: питающее напряжение – 3·380 В; длительность и амплитуда однополярных импульсов синусоидальной формы – 150 мкс и 15 кА; частота воспроизведения импульсов – 0 – 200 Гц; эквивалентная емкость конденсаторов – 1000 мкФ.

Для электростимулированной обработки металлов давлением характерны высокие требования к качеству переходных процессов и быстродействию генератора импульсов тока, что приводит к необходимости создания систем автоматического управления энергосиловыми параметрами. Ручное или некачественное регулирование обычно приводит к поломке оборудования и увеличению брака [27].

Генератор может работать в двух режимах: регулирования частоты воспроизведения или амплитуды им-

пульса тока. Для процесса электростимулированного волочения обычно используется первый режим работы, когда в широких (0 – 500 Гц) пределах изменяется частота воспроизведения импульсов тока. Работа в режимах регулирования амплитуды импульсов требуется, например, в тех случаях, когда диаметр обрабатываемой проволоки незначительный. При этом импульс с большой амплитудой может привести к обрыву заготовки из-за возникающего динамического удара или перегрева. Регулирование амплитуды импульсов возможно в режимах теплового волочения заготовки, а также в процессах прокатки и штамповки.

Целью настоящей работы является разработка и создание генератора мощных токовых импульсов с управляемым преобразователем в качестве источника питания зарядного устройства для регулирования параметров импульсов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе исследуется режим работы генератора с регулированием амплитуды импульсов тока путем изменения напряжения на силовых конденсаторах. Регулирование напряжения на конденсаторах может быть выполнено, например, с помощью неперереверсивного тиристорного преобразователя, используемого в качестве регулируемого источника питания зарядного устройства (ЗУ) [28]. Недостатком такого метода является отсутствие отрицательной составляющей тока ЗУ (тока разряда), что приводит к неуправляемому длительному процессу разряда конденсаторов и значительному снижению быстродействия генератора при необходимости уменьшить амплитуду импульсов. Для устранения этого недостатка в генераторе мощных импульсов, структурная схема которого показана на рис. 2, применен реверсивный тиристорный преобразователь.

Генератор содержит блок заряда с реверсивным тиристорным преобразователем, состоящий из встречно-параллельно включенных тиристорных мостов $SV1$, $SV2$, который подключен к конденсаторам CB через последовательно соединенные эквивалентные активное сопротивление $R1$ и индуктивность $L1$, блок разряда конденсаторов на нагрузку (конденсаторы CB , тиристорный ключ $VS3$, нагрузка Rn), узел перезаряда YP (трансформатор M , диод $VD1$, резистор $R3$, усилитель $G3$ с блоком $S3$ ограничения), принцип действия которого описан в работе [29], а также систему автоматического управления (САУ) параметрами генератора (блок задания напряжения BZU , регуляторы RNZ , RU , датчики основных параметров DTZ , DU).

Для анализа динамических режимов работы генератора в среде MatLab – Simulink создана имитационная модель (рис. 3), которая содержит перечисленные выше блоки. Наименование элементов блоков в структурной схеме и в модели идентичны.



Рис. 1. Внешний вид генератора мощных импульсов тока [26]:
 1 – система формирования управляющих импульсов;
 2 – блоки тиристорного преобразователя; 3 – конденсаторные
 блоки; 4 – вентилятор; 5 – волочильный стан

Fig. 1. Appearance of generator of high power current pulses [26]:
 1 – system of control pulses generation;
 2 – blocks of thyristor
 converter; 3 – capacitor units; 4 – fan-tor; 5 – drawing mill

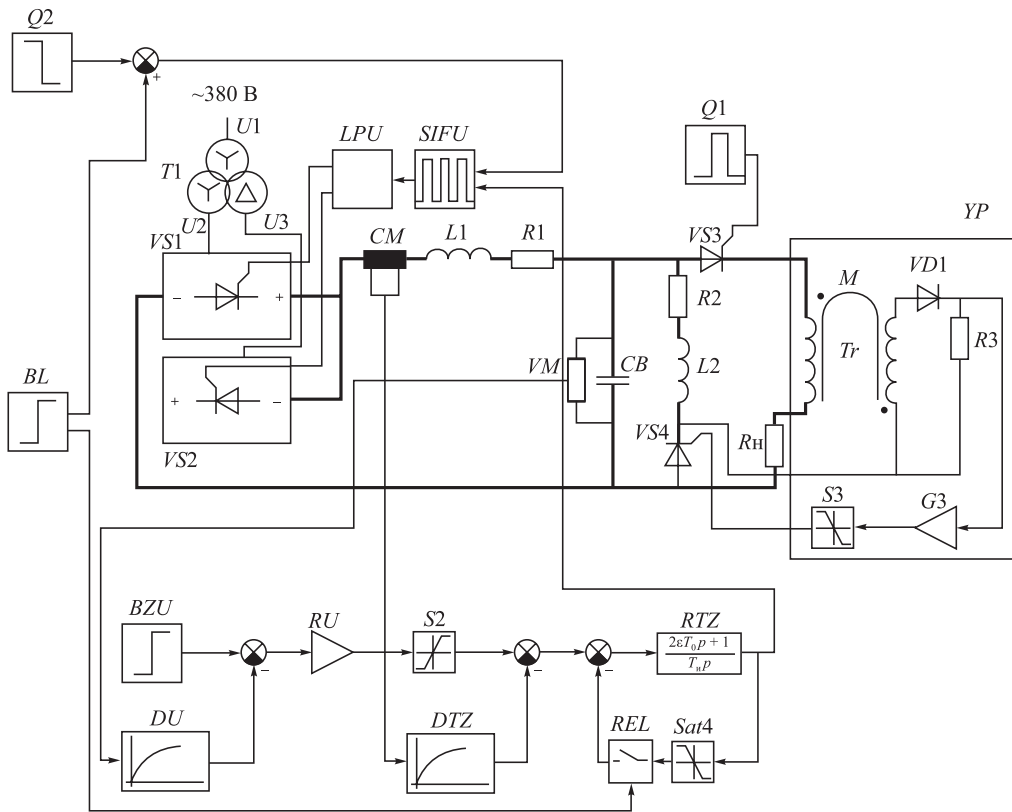


Рис. 2. Структурная схема САУ генератора мощных импульсов тока

Fig. 2. Structural diagram of ACS generator of high power current pulses

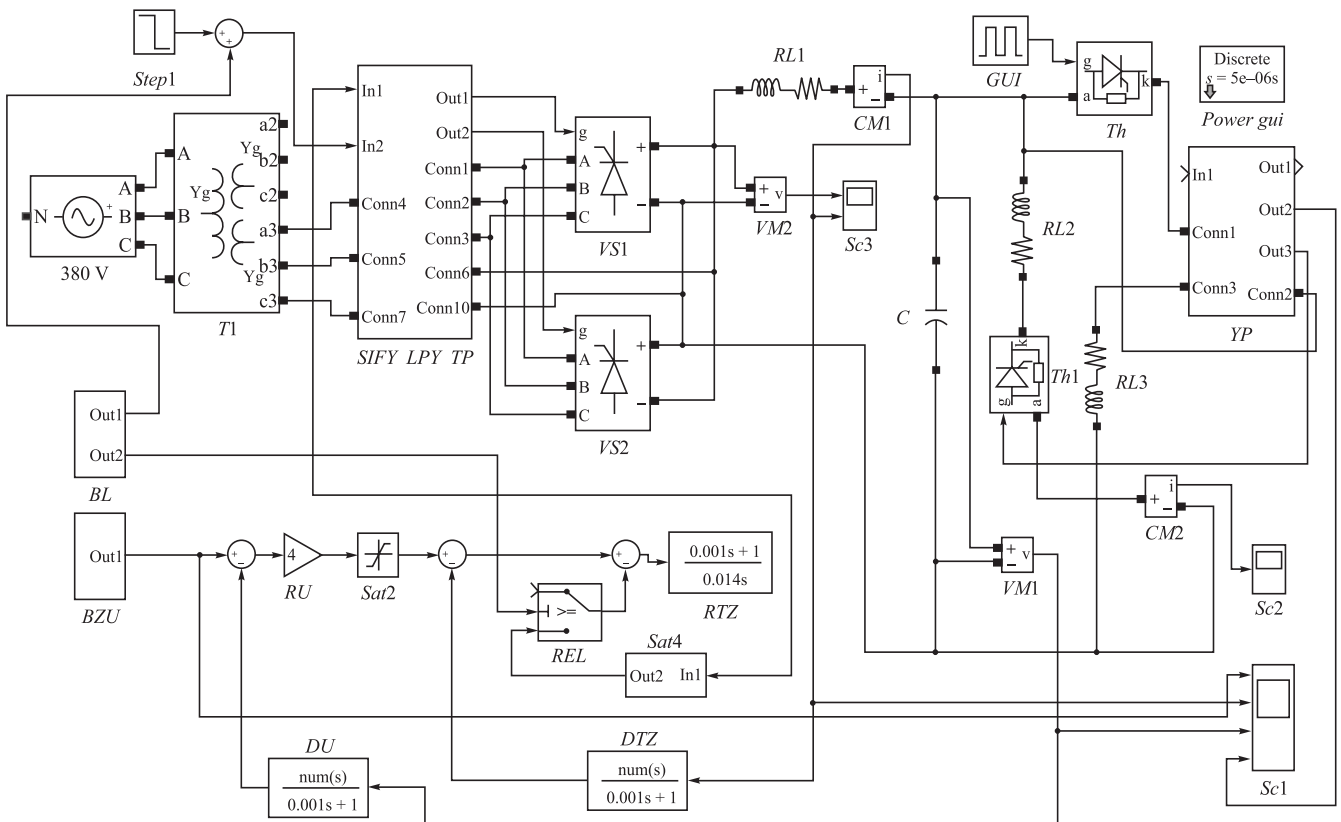


Рис. 3. Модель генератора с реверсивным преобразователем

Fig. 3. Model of generator with reversible converter

Система автоматического управления параметрами зарядного устройства генератора выполнена как система подчиненного регулирования и содержит два контура регулирования: внутренний – тока заряда конденсаторов (далее контур тока), состоящий из ПИ-регулятора тока RTZ , реверсивного тиристорного преобразователя (РТП), объекта регулирования и обратной связи, содержащей малоинерционный датчик тока DTZ ; внешний – напряжения на конденсаторах (далее контур напряжения), состоящий из П-регулятора напряжения RU , оптимизированного контура тока, объекта регулирования (емкости конденсаторов CB), а также датчика обратной связи по напряжению DU . Вышеперечисленные контуры настраиваются на модульный оптимум.

Передаточная функция $W_{ТП}$ тиристорного преобразователя равна 30:

$$W_{ТП} = \frac{K_{ТП}}{T_{\muТП} p + 1}, \quad (1)$$

где $K_{ТП} = 60$ и $T_{\muТП} = 5$ мс – коэффициент усиления и малая (некомпенсируемая) постоянная времени тиристорного преобразователя.

Передаточная функция $W_{ОТ}$ объекта регулирования тока заряда имеет вид

$$W_{ОТ} = \frac{1/C}{T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1}, \quad (2)$$

где C – емкость конденсаторной батареи, Φ ; T_0 – постоянная времени колебательного контура тока, с; ξ – коэффициент затухания колебательного контура тока; p – оператор Лапласа.

Передаточная функция $W_{ОН}$ объекта регулирования напряжения на конденсаторах равна:

$$W_{ОН} = \frac{1}{C}. \quad (3)$$

Результаты настройки САУ приведены на рис. 3.

Если $T_0^2 \gg 2\xi T_0$, то величиной $T_0^2 p^2$ в формуле (2) можно пренебречь. В этом случае передаточная функция объекта регулирования тока упрощается и имеет вид:

$$W_{ОТ} = \frac{1/C}{2\xi T_0 p + 1}, \quad (4)$$

Известно, что при настройке на модульный оптимум используется пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, а его передаточная функция имеет следующий вид:

$$W_{PI} = \frac{2\xi T_0 p + 1}{T_{иP}}, \quad (5)$$

где постоянная времени определяется по формуле

$$T_{и} = 2T_{\muТП} (CK_{ТП} K_{ДТ}); \quad (6)$$

здесь $K_{ДТ}$ – коэффициент усиления датчика тока.

Сопrotивление $R1$ состоит из последовательно соединенных эквивалентного сопротивления зарядной цепи (активное сопротивление обмоток трансформатора, ошиновки и тиристоров преобразователя и др.), а также дополнительного резистора и выбирается из условий минимизации потерь мощности на сопротивлении. Для указанного генератора сопротивление должно составлять 0,5 – 1,0 Ом. Индуктивность $L1$ выбирается таким образом, чтобы выполнялось условие $T_0^2 \gg 2\xi T_0$.

Регулятор напряжения выполнен как пропорциональный регулятор с коэффициентом усиления $k_{pc} = \frac{CK_{ДТ}}{4T_{\muТП} k_{дн}}$ (здесь $k_{дн}$ – коэффициент усиления датчика напряжения).

На рис. 3 представлена имитационная модель генератора с тиристорным реверсивным преобразователем в ЗУ.

Недостатком приведенной схемы является значительная (более 100 %) величина перерегулирования тока заряда в момент появления возмущающих воздействий длительностью около 0,6 мс, связанных с прохождением импульса тока и переходным процессом перезаряда конденсаторов (рис. 4, б). Это происходит из-за большой величины некомпенсируемой постоянной времени контура тока САУ, которая составляет не менее 5 мс (см. формулу (1)), что в 100 раз больше времени прохождения возмущающих воздействий. Таким образом, САУ не может компенсировать возмущающее воздействие из-за инерционности, что приводит к перерегулированию тока заряда в момент появления и развития возмущения.

Для улучшения качества тока заряда в схему САУ введен блок логики BL , блокирующий на время действия возмущающих воздействий работу тиристорного преобразователя и САУ путем отключения управляющих импульсов тиристорного преобразователя, а также шунтирования ПИ-регулятора тока RTZ . На рис. 4, в приведен график изменения тока заряда после установки логического устройства, где перерегулирование полностью отсутствует.

Для сравнения переходных процессов снижения напряжения (разряда) на конденсаторах приведены графики изменения напряжения разряда конденсаторов с использованием неревверсивного (рис. 4, д) и реверсивного (рис. 4, ж) преобразователей. При формировании задающего сигнала блока BZU на снижение напряжения конденсаторов на реверсивном преобразователе появляется отрицательный ток величиной 20 А, а время отработки сигнала задания на снижение напряжения составляет для реверсивного преобразователя 0,05 мс (рис. 4, е, ж). В неревверсивном преобразователе отрицательная составляющая тока отсутствует (рис. 4, з),

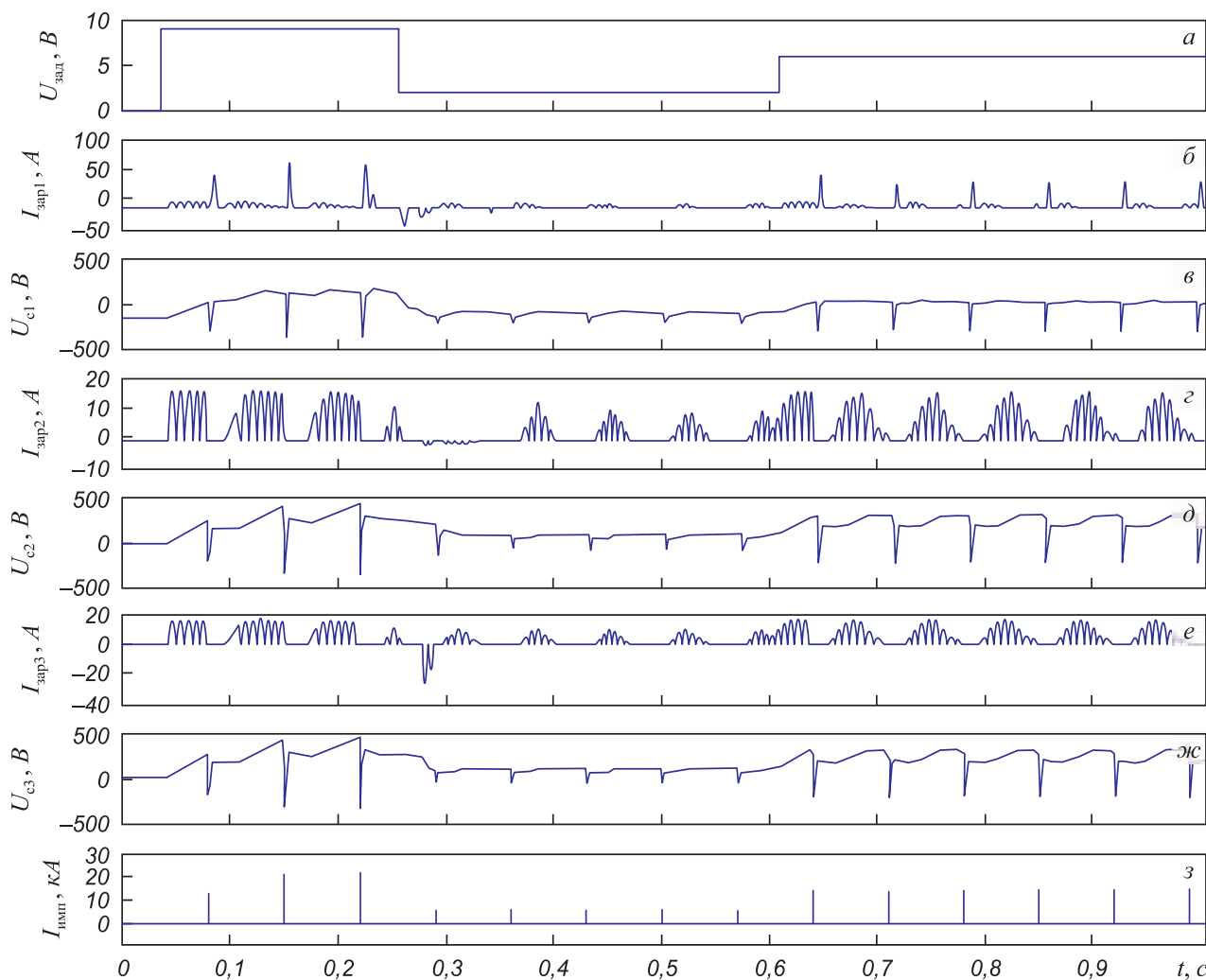


Рис. 4. Графики переходных процессов зарядного устройства генератора импульсов тока:
a – сигнал задания напряжения ($U_{\text{зад}}$) конденсаторов; *б* – ток ($I_{\text{зар}1}$) заряда (разряда) ЗУ с реверсивным преобразователем без блока *BL*;
в – напряжение ($U_{\text{с}1}$) на конденсаторах с использованием ЗУ с реверсивным преобразователем без блока *BL*; *г* – ток ($I_{\text{зар}2}$) заряда ЗУ с неревсивным преобразователем; *д* – напряжение ($U_{\text{с}2}$) на конденсаторах с использованием ЗУ с неревсивным преобразователем;
е – ток ($I_{\text{зар}3}$) заряда (разряда) конденсаторов с реверсивным преобразователем; *ж* – напряжение ($U_{\text{с}3}$) на конденсаторах с использованием ЗУ с реверсивным преобразователем; *з* – импульсы тока ($I_{\text{имп}}$) генератора

Fig. 4. Charts of transients of charger of current pulse generator:
a – voltage reference signal (U_{set}) of capacitors; *б* – current ($I_{\text{charge}1}$) of the charge (discharge) of the charger with reversing converter without the *BL* block; *в* – voltage ($U_{\text{c}1}$) on capacitors using charger with reversing converter without *BL* unit; *г* – current ($I_{\text{charge}2}$) of the charger with a non-reversible converter; *д* – voltage ($U_{\text{c}2}$) on capacitors using charger with non-reversible converter; *е* – current ($I_{\text{charge}3}$) of charge (discharge) of capacitors with reversible converter; *ж* – voltage ($U_{\text{c}3}$) on capacitors using charger with a reversing converter; *з* – current pulses (I_{imp}) of generator

поэтому время отработки задания составляет 0,12 мс (рис. 4, *г*, *д*).

Недостатком приведенной схемы является низкая (менее 200 Гц) частота воспроизведения импульсов из-за низкого быстродействия САУ. Это связано в первую очередь с применением типового, дешевого, но достаточно инерционного тиристорного преобразователя, выполненного на шести тиристорах по схеме Ларионова, некомпенсированная постоянная времени которого составляет 5 мс. Для увеличения частоты воспроизведения импульсов до 400 Гц и выше необходимо применение тиристорного преобразователя с 12-импульсной системой выпрямления или схемы с использованием

преобразователя частоты (например, выполненного по системе «выпрямитель – фильтр – инвертор»), что приведет к увеличению стоимости генератора.

Выводы

Предложена схема генератора импульсов тока с типовым реверсивным тиристорным преобразователем в качестве источника питания зарядного устройства, что позволяет увеличить быстродействие процесса регулирования напряжения (величины амплитуды импульсов тока) на конденсаторах. Коэффициент заполнения токовой диаграммы в переходных процессах

заряда (разряда) конденсаторов не ниже 0,7 – 0,9, что приводит к улучшению качества питающей сети. Частота воспроизведения импульсов зависит от малой постоянной времени тиристорного преобразователя $T_{\text{итп}}$. Для преобразователя, выполненного по схеме Ларионова, который рассматривается в настоящей работе, $T_{\text{итп}} = 5$ мс, а максимальная частота воспроизведения импульсов составляет 200 Гц. Применение более качественных преобразователей в ЗУ позволит увеличить частоту воспроизведения импульсов до 1000 Гц при некотором увеличении стоимости генератора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металла. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
2. Климов К.М., Невинов И.И. К вопросу об электропластическом эффекте // Проблемы прочности. 1984. № 2. С. 98 – 103.
3. Беклемишев Н.Н. Обработка проводящих материалов локально неоднородным электромагнитным полем // Электротехника. 1982. Т. 53. № 11. С. 113 – 117.
4. Климов К.М., Шнырев Г.Д., Новиков И.И. Изменение пластичности вольфрама под влиянием электрического тока // Металловедение и термическая обработка металлов. 1977. Т. 19. № 1. С. 58, 59.
5. Климов К.М., Шнырев Г.Д., Новиков И.И., Исаев А.В. Электростимулированная прокатка в ленту микронных сечений из вольфрама и его сплавов // Изв. АН СССР. Серия Металлы. 1975. № 4. С. 143, 144.
6. Yongda Ye, Song-Zhu Kure-Chu, Zhiyan Sun, Xiaopei Li, Haibo Wang, Guoyi Tang. Nanocrystallization and enhanced surface mechanical properties of commercial pure titanium by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling // Materials & Design. 2018. Vol. 149. No. 5. P. 214 – 227.
7. Chen Long, Wang Haibo, Liu Dan, Ye Xiaoxin, Li Xiaoliui, Tang Guojil. Effects of electropulsing cutting on the quenched and tempered 45 steel rods // Journal of Wuhan University of Technology-Mater. 2018. Vol. 33. P. 204 – 211
8. Ruikun Zhang, Xiaohui Li, Jie Kuang, Xiaopei Li & Guoyi Tang, Texture modification of magnesium alloys during electropulse treatment // Materials Science and Technology. 2017. Vol. 33. P. 1421 – 1427.
9. Xiaopei Li, Xiaohui Li, Yongda Ye, Ruikun Zhang, Song-Zhu Kure-Chu, Guoyi Tang. Deformation mechanisms and recrystallization behavior of Mg – 3Al – Zn and Mg – IGd alloys deformed by electroplastic-asymmetric rolling // Materials Science & Engineering A. 2019. Vol. 742. P. 722 – 733.
10. Yong-Da Ye, Xiao-Pei Li, Zhi-Yan Sun, Hai-Bo Wang, Guo-Yi Tang. Enhanced surface mechanical properties and microstructure evolution of commercial pure titanium under electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling process // The Chinese Society for Metals and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature. 2018. Vol. 31. No. 12. P. 1272 – 1280.
11. Tang G., Zhang J., Yan Y., Zhou H., Fang W. The engineering application of the electroplastic effect in the cold-drawing of stainless steel wire // J. Mater. Process. Technol. 2003. Vol. 137. No. 1. P. 96 – 99.
12. Kozlov A., Mordyuk B., Chemyashevsky A. On the additivity of acoustoplastic and electroplastic effects // Mater. Sci. Eng. A. 1995. Vol. 190. No. 1. P. 75 – 79.
13. Brandt J. Ruskiewicz, Tyler Grimm, Ihab Ragai, Laine Mears, John T. Roth a review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2017. Vol. 139. No. 11. P. 110801-1 – 110801-15.
14. Fan G., Sun F., Meng X., Gao L., Tong G. Electric hot incremental forming of Ti – 6Al – 4V titanium sheet // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2010. Vol. 49. No. 9-12. P. 941 – 947.
15. Fan G., Gao L., Hussain G., Wu Z. Electric hot incremental forming: a novel technique // Int. J. Mach. Tools Manuf. 2008. Vol. 48. No. 15. P. 1688 – 1692.
16. Shi X., Gao L., Khalatbari H., Xu Y., Wang H., Jin L. Electric hot incremental forming of low carbon steel sheet: accuracy improvement // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2013. Vol. 68. No. 1-4. P. 241 – 247.
17. Bao W., Chu X., Lin S., Gao J. Experimental investigation on formability and microstructure of AZ31B alloy in electropulse-assisted incremental forming // Mater. Des. 2015. No. 87. P. 632 – 639.
18. Honarpisheh M., Abdolhoseini M., Amini S. Experimental and numerical investigation of the hot incremental forming of Ti – 6Al – 4V sheet using electrical current // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. Vol. 83. No. 9-12. P. 2027 – 2037.
19. Xu D., Lu B., Cao T., Zhang H., Chen J., Long H., Cao J. Enhancement of process capabilities in electrically-assisted double sided incremental forming // Mater. Des. 2016. No. 92. P. 268 – 280.
20. Liu R., Lu B., Xu D., Chen J., Chen F., Ou H., Long H. Development of novel tools for electricity-assisted incremental sheet forming of titanium alloy // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. Vol. 85. No. 5-8. P. 1137 – 1144.
21. Xie H., Dong X., Peng F., Wang Q., Liu K., Wang X., Chen F. Investigation on the electrically-assisted stress relaxation of AZ31B magnesium alloy sheet // J. Mater. Process. Technol. 2016. No. 227. P. 88 – 95.
22. Adams D., Jeswiet J. Single-point incremental forming of 6061-T6 using electrically assisted forming methods // Proc. Inst. Mech. Eng. 2014. Vol. 228. No. 7. P. 757 – 764.
23. Valoppi B., Egea A.J.S., Zhang Z., Rojas H.A.G., Ghiotti A., Bruschi S., Cao J. A hybrid mixed double-sided incremental forming method for forming Ti6Al4V alloy // CIRP Aim. Manuf. Technol. 2016. Vol. 65. No. 1. P. 309 – 312.
24. Nguyen-Tran H., Oh H., Hong S., Han H.N., Cao J., Ahn S., Chun D. A review of electrically-assisted manufacturing // Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Technol. 2015. Vol. 2. No. 4. P. 365 – 376.
25. Guan L., Tang G., Chu P.K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals // J. Mater. Res. 2010. Vol. 25. No. 7. P. 1215 – 1224.
26. А.с. № 884092 СССР. Генератор мощных импульсов тока / В.А. Кузнецов, В.Е. Громов, В.П. Симаков. Бюл. изобр. 1981. № 43.
27. Кузнецов В.А., Громов В.Е. Экономичный тиристорный генератор мощных импульсов тока // Изв. вуз. Электромеханика. 1986. № 6. С. 122 – 124.
28. Жмакин Ю.Д., Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Кузнецов В.А., Громов В.Е. Генератор мощных токовых импульсов для интенсификации обработки металлов давлением // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 8. С. 42 – 44.
29. Кузнецов В.А., Полковников Г.Д., Кузнецова Е.С., Громов В.Е. Разработка системы автоматического управления электростимулированным волочением с использованием мощных импульсов тока. – В кн.: Труды восьмой Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника» / Под ред. В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2018. С. 132 – 138.
30. Онищенко Г.Б., Аксенов М.И., Грехов В.П. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Под общ. ред. Г.Б. Онищенко. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.

Поступила в редакцию 16 апреля 2019 г.
 После доработки 8 мая 2019 г.
 Принята к публикации 14 мая 2019 г.

HIGH POWER CURRENT PULSE GENERATOR BASED ON REVERSIBLE THYRISTOR CONVERTER

V.A. Kuznetsov¹, G.D. Polkovnikov¹, V.E. Gromov¹,
E.S. Kuznetsova¹, O.A. Peregudov²

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo
Region, Russia

²Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract. In metal forming using high power current pulses, it becomes necessary to control both reproduction frequency and pulse amplitude. Description of a generator of high power current pulses with controlled thyristor converter is provided as a power source of charging device (charger) for regulating voltage (pulse amplitude) of capacitor charge. Faults of the generators associated with inrush current in capacitor charge modes are revealed, which reduces quality of supply network. To reduce time of transient processes while lowering voltage across capacitors, application of reverse thyristor converter is applied as a power source. Structural diagram of generator is considered, which includes reversible thyristor converter with separate control, power unit, capacitor recharge device, charger parameters automatic control system and capacitor charge process control system. Calculation of parameters of automatic control system regulators is presented. To obtain optimal transients, standard methodology for setting regulators to a modular optimum was used. In order to reduce overshoot at time of disturbances appearance, which can reach 100 % and higher, so-called logical device was introduced into the automatic control system. It blocks control pulses on thyristors of converter and simultaneously reduces signal at the output of current regulator to zero. Simulation model of high power current pulse generator in MatLab – Simulink environment was synthesized. Analysis of the model was carried out, and graphs are given that explain principle of device operation and transition processes under various operating modes. Generator application will allow user to adjust amplitude of current pulses with high speed and to obtain sufficiently high-quality transient processes of capacitors charge (discharge), which will have beneficial effect on supply network. Application of better converters will significantly increase frequency of reproduction of current pulses.

Keywords: generator of high power current pulses, generator charger, system for automatically regulating generator parameters, capacitor voltage and charge current control loops.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-12-964-971

REFERENCES

- Spitsyn V.I., Troitskii O.A. *Elektroplasticheskaya deformatsiya metalla* [Electroplastic deformation of metal]. Moscow: Nauka, 1985, 160 p. (In Russ.).
- Klimov K.M., Nevikov I.I. Electroplastic effect. *Problemy prochnosti*. 1984, no. 2, pp. 98–103. (In Russ.).
- Beklemishev N.N. Working of conducting materials by means of a locally nonuniform pulsed electromagnetic field. *Soviet Electrical Engineering*. 1982, vol. 53, no. 11, pp. 113–117.
- Klimov K.M., Shnyrev G.D., Novikov I.I. Change in the ductility of tungsten under the influence of electric current. *Metal Science and Heat Treatment*. 1977, vol. 19, no. 1, pp. 58–59.
- Klimov K.M., Shnyrev G.D., Novikov I.I., Isaev A.V. Electrostimulated rolling into a tape of micron sections of tungsten and its alloys. *Izv. AN SSSR. Seriya Metallurgiya*. 1975, no. 4, pp. 143, 144. (In Russ.).
- Yongda Ye, Song-Zhu Kure-Chu, Zhiyan Sun, Xiaopei Li, Haibo Wang, Guoyi Tang. Nanocrystallization and enhanced surface mechanical properties of commercial pure titanium by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling. *Materials & Design*. 2018, vol. 149, no. 5, pp. 214–227.
- Chen Long, Wang Haibo, Liu Dan, Ye Xiaoxin, Li Xiaoliui, Tang Guojil. Effects of electropulsing cutting on the quenched and tempered 45 steel rods. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*. 2018, vol. 33, pp. 204–211.
- Ruikun Zhang, Xiaohui Li, Jie Kuang, Xiaopei Li & Guoyi Tang. Texture modification of magnesium alloys during electropulse treatment. *Materials Science and Technology*. 2017, vol. 33, pp. 1421–1427.
- Xiaopei Li, Xiaohui Li, Yongda Ye, Ruikun Zhang, Song-Zhu Kure-Chu, Guoyi Tang. Deformation mechanisms and recrystallization behavior of Mg – 3Al – 1Zn and Mg – 1Gd alloys deformed by electroplastic-asymmetric rolling. *Materials Science & Engineering A*. 2019, vol. 742, pp. 722–733.
- Yong-Da Ye, Xiao-Pei Li, Zhi-Yan Sun, Hai-Bo Wang, Guo-Yi Tang. Enhanced surface mechanical properties and microstructure evolution of commercial pure titanium under electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling process. *The Chinese Society for Metals and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature*. 2018, vol. 31, no. 12, pp. 1272–1280.
- Tang G., Zhang J., Yan Y., Zhou H., Fang W. The engineering application of the electroplastic effect in the cold-drawing of stainless steel wire. *J. Mater. Process. Technol.* 2003, vol. 137, no. 1, pp. 96–99.
- Kozlov A., Mordiyuk B., Chemyashevsky A. On the additivity of acoustoplastic and electroplastic effects. *Mater. Sci. Eng. A*. 1995, vol. 190, no. 1, pp. 75–79.
- Brandt J. Ruzskiewicz, Tyler Grimm, Ihab Ragai, Laine Mears, John T. Roth a review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2017, vol. 139, no. 11, pp. 110801-1–110801-15.
- Fan G., Sun F., Meng X., Gao L., Tong G. Electric hot incremental forming of Ti – 6Al – 4V titanium sheet. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2010, vol. 49, no. 9-12, pp. 941–947.
- Fan G., Gao L., Hussain G., Wu Z. Electric hot incremental forming: a novel technique. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2008, vol. 48, no. 15, pp. 1688–1692.
- Shi X., Gao L., Khalatbari H., Xu Y., Wang H., Jin L. Electric hot incremental forming of low carbon steel sheet: accuracy improvement. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013, vol. 68, no. 1-4, pp. 241–247.
- Bao W., Chu X., Lin S., Gao J. Experimental investigation on formability and microstructure of AZ31B alloy in electropulse-assisted incremental forming. *Mater. Des.* 2015, no. 87, pp. 632–639.
- Honarpisheh M., Abdolhoseini M., Amini S. Experimental and numerical investigation of the hot incremental forming of Ti – 6Al – 4V sheet using electrical current. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, vol. 83, no. 9-12, pp. 2027–2037.
- Xu D., Lu B., Cao T., Zhang H., Chen J., Long H., Cao J. Enhancement of process capabilities in electrically-assisted double sided incremental forming. *Mater. Des.* 2016, no. 92, pp. 268–280.
- Liu R., Lu B., Xu D., Chen J., Chen F., Ou H., Long H. Development of novel tools for electricity-assisted incremental sheet forming of titanium alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, vol. 85, no. 5-8, pp. 1137–1144.
- Xie H., Dong X., Peng F., Wang Q., Liu K., Wang X., Chen F. Investigation on the electrically-assisted stress relaxation of AZ31B magnesium alloy sheet. *J. Mater. Process. Technol.* 2016, no. 227, pp. 88–95.
- Adams D., Jeswiet J. Single-point incremental forming of 6061-T6 using electrically assisted forming methods. *Proc. Inst. Mech. Eng.* 2014, vol. 228, no. 7, pp. 757–764.

23. Valoppi B., Egea A.J.S., Zhang Z., Rojas H.A.G., Ghiotti A., Brusch S., Cao J. A hybrid mixed double-sided incremental forming method for forming Ti6Al4V alloy. *CIRP Aim. Manuf. Technol.* 2016, vol. 65, no. 1, pp. 309–312.
24. Nguyen-Tran H., Oh H., Hong S., Han H.N., Cao J., Ahn S., Chun D. A review of electrically-assisted manufacturing. *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Technol.* 2015, vol. 2, no. 4, pp. 365–376.
25. Guan L., Tang G., Chu P.K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals. *J. Mater. Res.* 2010, vol. 25, no. 7, pp. 1215–1224.
26. Kuznetsov V.A., Gromov V.E., Simakov V.P. *Generator moshchnykh impul'sov toka* [High power pulse generator]. Certificate of authorship USSR no. 884092. *Byulleten' izobretenii.* 1981, no. 43. (In Russ.).
27. Kuznetsov V.A., Gromov V.E. Effective high power pulse generator. *Izv. vuz. Elektromekhanika.* 1986, no. 6, pp. 122–124. (In Russ.).
28. Zhmakin Yu.D., Zagulyaev D.V., Kononov S.V., Kuznetsov V.A., Gromov V.E. High power current pulse generator for intensification of metal forming. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2008, no. 8, pp. 42–44. (In Russ.).
29. Kuznetsov V.A., Polkovnikov G.D., Kuznetsova E.S., Gromov V.E. Development of automatic control system for electrostimulated drawing using high power current pulses. In: *Trudy vos'moi Vse-rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Avtomatizirovannyyi elektroprivod i promyshlennaya elektronika"* [Proceedings of the 8th All-Russ. Sci. and Pract. Conf. "Automated Electric Drive and Industrial Electronics"]. Ostrovlyanchik V.Yu. ed. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2018, pp. 132–138. (In Russ.).
30. Onishchenko G.B., Aksenov M.I., Grekhov V.P. *Avtomatizirovannyyi elektroprivod promyshlennykh ustanovok* [Automated electric drive of industrial units]. Onishchenko G.B. ed. Moscow: RASKhN, 2001, 520 p. (In Russ.).

Funding. The work was financially supported by the state assignments of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project 3.1283.2017/4,6.

Information about the authors:

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

G.D. Polkovnikov, *MA Student of the Chair of Electrical Engineering, Electric Drive and Industrial Electronics* (george42rus@gmail.com)

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

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

O.A. Peregudov, *Cand. Sci. (Eng.), Assistant of the Rector for Youth Policy* (olegomgtu@mail.ru)

Received April 16, 2019

Revised May 8, 2019

Accepted May 14, 2019