

УДК 669.71:621.778:662.523

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ ГЕНЕРАТОРА МОЩНЫХ ТОКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

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

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

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

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская область – Кузбасс., ул. Кирова, 42)

<sup>2</sup> Омский государственный технический университет  
(644050, Россия, г. Омск, пр. Мира, 11)

**Аннотация.** Разработана электромеханическая установка, которая содержит электромагнитный соленоид с поршнем, работающим в режиме возвратно-поступательного движения. Технологии с подобными режимами работы широко используются в различных отраслях промышленности (машиностроительной, металлургической, горнодобывающей, механотронике, робототехнике, в качестве прессов при ковке и штамповке, а также отбойных молотков в устройствах дробления угля, руды и породы). В качестве источника питания электромеханического устройства используется экономичный генератор мощных однополярных импульсов тока с уникальными системами, которые позволяют в широком диапазоне и с высоким быстродействием регулировать основные параметры: частоту воспроизведения импульсов, амплитуду. Принцип действия генератора основан на периодическом разряде предварительно заряженных конденсаторов на низкоомную активно-индуктивную нагрузку. Генератор содержит силовую часть, состоящую из блока разряда конденсаторов на нагрузку, систему управления генератором (СУГ), состоящую из блока заряда конденсаторов (реверсивный тиристорный преобразователь со встречно-параллельно включенными тиристорными мостами), узел перезаряда, систему автоматического регулирования САУ. По известным уравнениям рассчитаны параметры механической и электрической частей электромеханического устройства: начальная координата поршня; магнитодвижущая сила, возникающая из-за изменения индуктивности  $L(x)$ ; сила упругости пружины; сила сопротивления поршню, пропорциональная скорости его перемещения; силовое воздействие на поршень; амплитуда, длительность и частота воспроизведения импульсов тока. В среде Матлаб–Симулинк разработана имитационная модель установки. Построены графики переходных процессов при работе установки на холостом ходу и под нагрузкой. Проведен анализ режимов работы установки. Разработанная электромеханическая установка для воздействия на нагрузку с целью ее разрушения или деформации на базе генератора мощных импульсов тока с системой автоматического регулирования параметров позволяет с высоким быстродействием регулировать параметры процесса: усилие и пройденное поршнем расстояние.

**Ключевые слова:** электромеханическая установка, генератор мощных импульсов тока, конденсаторная батарея, зарядное устройство, тиристорный коммутатор.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-9-755-762

### ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в развитии современной техники требует использования новых конструкционных материалов с высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками. Такие материалы и изделия из них не могут быть получены и обработаны традиционными методами. Поэтому одной из важнейших задач научно-технической политики является создание и внедрение качественно новых технологических процессов, в том числе с использованием внешних энергетических воздействий, влияющих на прочность и пластичность материалов. Экспериментальные исследования электрических токов большой плотности, высокоэнергетических электромагнитных полей, токов плазмы, лазерного излучения и комбинированных воз-

действий на электропроводящие материалы привели к созданию нового класса высокопроизводительных технологических приемов обработки материалов.

Для отечественной и зарубежной металлургической и машиностроительной отраслей промышленности получили распространение технологии с использованием мощных импульсных электрических токов при обработке труднодеформируемых металлов и сплавов [1]. Это процессыковки и прокатки [2 – 7], волочения [8 – 10], металлообработки [11 – 17], спекания [18 – 20], соединения материалов (скрепления) [21 – 27], листовой штамповки [28 – 40] и другие. Детальный обзор этих технологий приведен в работах [41, 42]. В основе промышленных электротехнологий лежит использование мощных источников электрического тока [43, 44]. Подобные технологии могут быть реализованы не только

при обработке металлов давлением, но и в горнодобывающей промышленности (дробление руды, угля, породы), а также мехатронике, робототехнике.

Целью настоящей работы является создание на базе генератора токовых импульсов электромеханической установки с возвратно-поступательным движением поршня и исследование его параметров.

## ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ УСТАНОВКИ

### И ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Основной частью установки является электромагнитный соленоид с поршнем (рис. 1). Устройство содержит магнитопровод с шихтованной сталью, на котором жестко закреплена катушка с намотанным на ней проводом. В стальной оболочке магнитопровода размещен поршень, соединенный с пружиной. Поршень совершает возвратно-поступательные движения по вертикальной координате  $x$ . Пружина с коэффициентом жесткости  $k = 2667$  Н/м в процессе деформации выполняет функцию возврата поршня в исходное положение после прекращения воздействия на электромагнит импульсного тока. В диапазоне координат  $x$  от 0,04 до 0,06 м (рабочая область движения поршня) поршень испытывает противодействие со стороны нагрузки, при этом в зависимости от усилия, противодействующего поршню, на расстоянии  $x = x_{\text{равн}}$  возникает точка равновесного состояния.

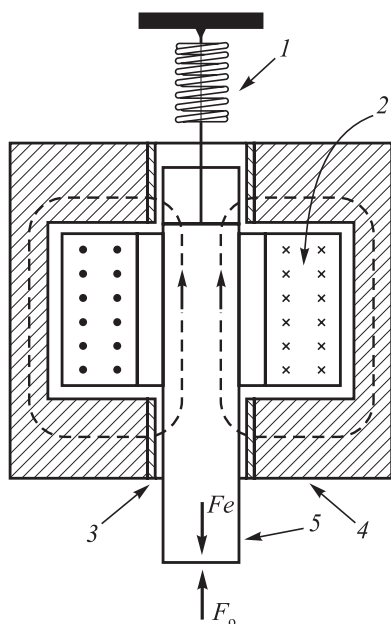


Рис. 1. Конструкция электромеханического устройства:  
1 – возвратная пружина; 2 – катушка соленоида; 3 – направляющее кольцо; 4 – стальной корпус с шихтованным железом; 5 – цилиндрический стальной поршень; 6 – силовое воздействие на поршень

Fig. 1. Design of the electromechanical installation:  
1 – returnable spring; 2 – solenoid coil; 3 – guide ring; 4 – steel body with laminated iron; 5 – cylindrical steel piston; 6 – force action on the piston

Переходный процесс движения поршня под действием электромагнитных усилий происходит в соответствии с известным уравнением [45]:

$$U = Ri + L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt}; \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение источника питания, В;  $i$  – ток, протекающий через обмотку электромагнита, А;  $R$  – активное эквивалентное сопротивление ошиновки и обмотки катушки, Ом;  $L(x)$  – индуктивность как функция координаты  $x$  поршня.

Основной переменной составляющей механической системы является координата движения поршня  $x$ . Уравнение механической части системы определяется на основании второго закона Ньютона

$$F_{\text{сум}} = Ma = M \frac{d^2x}{dt^2}, \quad (2)$$

где  $F_{\text{сум}}$  – равнодействующая сил на механическую часть системы, Н;  $M$  – масса стержня, кг;  $a$  – ускорение поршня, м/с.

Уравнение изменения переменной  $x$  имеет вид

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = Fe - k(x - x_0) - b \frac{dx}{dt} - F_0, \quad (3)$$

где  $x_0$  – начальная координата поршня, м;  $k$  – жесткость пружины, Н/м;  $b$  – коэффициент сопротивления, (Н·с)/м;  $Fe$  – магнитодвижущая сила, возникающая из-за изменения индуктивности  $L(x)$ , Н;  $F_{\text{пр}} = k(x - x_0)$  – сила упругости пружины, Н;  $F_{\text{тр}} = b \frac{dx}{dt}$  – сила сопротивления поршню, пропорциональная скорости его перемещения, Н;  $F_0$  – силовое воздействие на поршень, Н [45].

На рис. 2 представлена модель электромеханической части устройства, выполненная в среде «Матлаб–Симулинк» [46, 47]. Модель состоит из вычислителей магнитодвижущей силы  $Fe = Fcn1$ , противоЭДС  $Ue = Fcn2$ , параметров нагрузочного устройства  $Fcn3$ , алгебраического сумматора  $Sym$ , а также других элементов схемы, реализующих зависимости в соответствии с уравнениями (1) – (3).

Для питания подобных электромеханических устройств обычно используют источники постоянного или переменного тока.

В настоящей работе для реализации установки использован генератор мощных импульсов тока, принцип действия и структурная схема которого приведена на рис. 3 [48, 49].

Принцип действия генератора основан на периодическом разряде на низкоомную активно-индуктивную нагрузку  $Rn$  предварительно заряженных конденсаторов СВ. Форма токового импульса такого генератора близка к синусоидальной, длительность импульса в зависимости от емкости конденсаторов и индуктивности

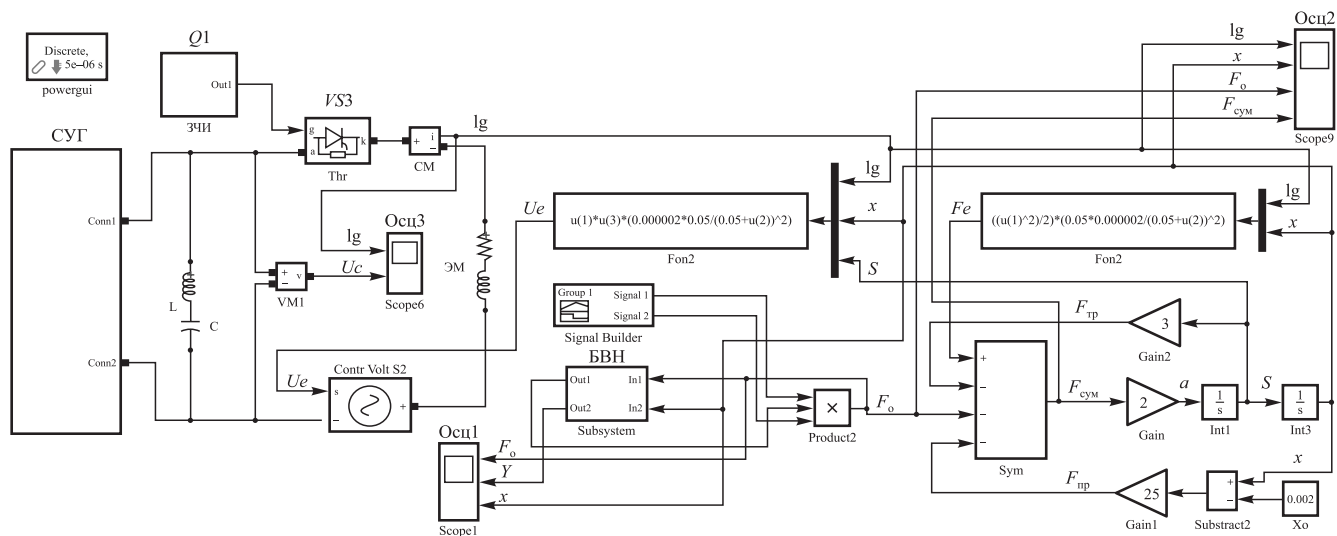


Рис. 2. Схема модели электромеханического устройства

Fig. 2. Scheme of the model of electromechanical installation

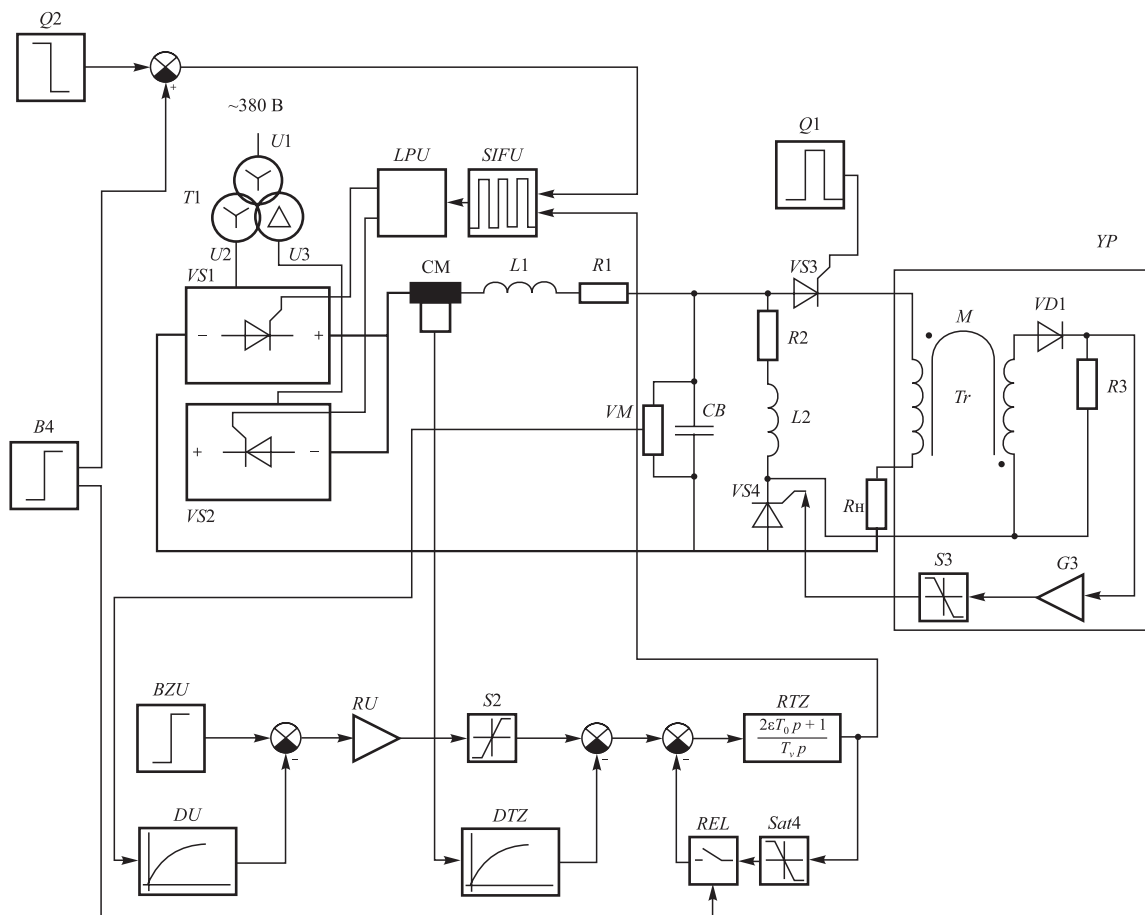


Рис. 3. Структурная схема генератора мощных импульсов тока

Fig. 3. Block diagram of the generator of high power current pulses

может составлять 100 – 10 000 мкс, а частота воспроизведения – до 1000 Гц.

Генератор содержит силовую часть, состоящую из блока разряда конденсаторов на нагрузку (конденсато-

ры СВ, тиристорный ключ  $VS3$ , нагрузка  $R_n$ ), и систему управления генератором (СУГ). Система управления генератором состоит из блока заряда конденсаторов (реверсивный тиристорный преобразователь – встреч-

но-параллельно включенные тиристорные мосты  $SV1$ ,  $SV2$ , которые подключены к конденсаторам СВ через последовательно соединенные эквивалентные активное сопротивление  $R1$  и индуктивность  $L1$ ), узел перезаряда  $YP$  (трансформатор  $M$ , диод  $VD1$ , резистор  $R3$ , усилитель  $G3$ , блок ограничения  $S3$ ). Система автоматического регулирования САУ размещена в блоке аналогичного названия (блок задания напряжения  $BZU$ , регуляторы  $RNZ$ ,  $RU$ , датчики основных параметров  $DTZ$ ,  $DU$ ). Модель силовой части генератора и системы управления СУГ показаны на рис. 2.

Сформированные в генераторе система автоматического управления САУ, реверсивный тиристорный преобразователь, а также устройство перезаряда позволяют в широком диапазоне и с высоким быстродействием регулировать его основные параметры (частоту воспроизведения импульсов и амплитуду) при значительном снижении мощности, потребляемой из сети 380 В переменного тока.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для создания возвратно-поступательного движения поршня устройство формирования управляющих импульсов  $Q1$  (рис. 2) в течение времени  $t_1 = 0,35$  с формирует «пачку» (7 единиц) импульсов регулируемой длительности, при этом поршень под действием маг-

нитозлектрической силы совершает рабочее движение «вперед». После прекращения действия импульсов в течение времени  $t_2 = 0,65$  с под действием упругой силы  $F_{пр}$  пружины поршень возвращается в исходное положение. Цикл движения поршня (суммарное время  $t_1 + t_2$ ) периодически повторяется, при этом возможно регулирование как длительности «пачки» импульсов, так и длительности цикла. Работа без нагрузки (холостой ход поршня) в период времени  $t_1 + t_2$  представлена на рис. 4.

Переходный процесс возвратно-поступательного движения поршня при приложении нагрузки показан на рис. 4 (период времени  $t_2 + t_3$ ). В процессе движения «вперед» в момент времени  $t_{21} = 1,1$  с поршень начинает испытывать противодействие (сила  $F_o$ ) со стороны нагрузки. При этом энергия поршня расходуется на деформацию нагрузки, а его скорость падает. В момент времени  $t_{22} = 1,25$  с нагрузка деформируется настолько, что ее усилие  $F_o$  значительно снижается. В момент времени  $t_{23} = 1,4$  с под действием остаточной силы нагрузки и сжатой пружины поршень возвращается в исходное положение (конец рабочего цикла) (рис. 4).

В имитационной модели электромагнита были использованы расчетные параметры элементов (см. таблицу).

На рис. 4 представлены зависимости переходных процессов модели электромеханического устройства

### Параметры элементов электромеханической установки

#### Parameters of the elements of electromechanical installation

Параметр элемента	Обозначение	Значение параметра
Механические		
Число витков катушки, витки	$N$	1
Толщина основания магнитопровода, м	$c$	0,05
Диаметр расточки магнитопровода, м	$d$	0,025
Ширина воздушного зазора, м	$g$	0,02
Масса поршня, кг	$M$	0,5
Жесткость пружины, Н/м	$k$	2667
Коэффициент сопротивления, Н·с/м	$b$	3
Начальное положение верхней кромки поршня, м	$x_o$	0,002
Электрические		
Амплитуда импульса тока генератора, А	$I_g$	2000
Длительность импульса, мс	$T_i$	1,5
Частота воспроизведения импульсов, Гц	$f_i$	100
Период воспроизведения «пачки» импульсов, с	$T_p$	1

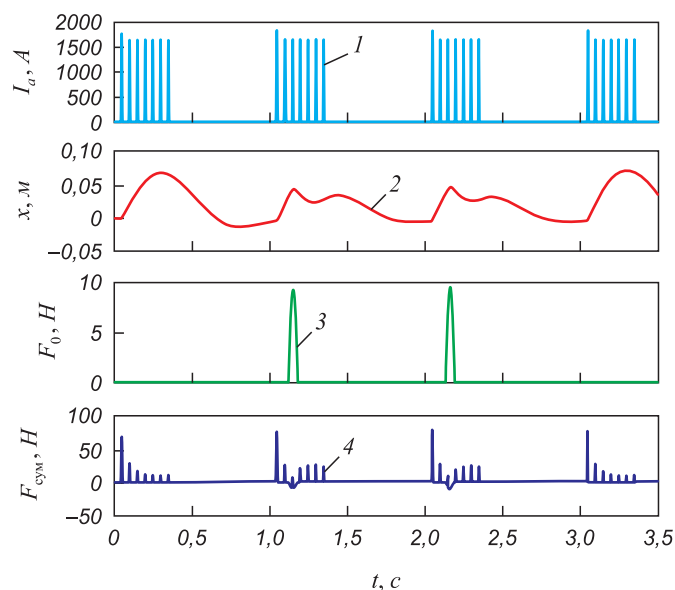


Рис. 4. Зависимости переходных процессов модели электромеханического устройства:

1 – импульсы тока генератора, А; 2 – расстояние  $x$ , пройденное поршнем, м; 3 – усилие  $F_o$  воздействия на поршень со стороны нагрузки, Н; 4 – суммарное усилие  $F_{\text{сум}}$  со стороны поршня и внешней нагрузки, Н

Fig. 4. Dependencies of transient processes of the model of electromechanical installation:

1 – current pulses of the generator, A; 2 – distance  $x$  traversed by the piston, m; 3 – force  $F_o$  of action on the piston from the load side, N; 4 – total force  $F_{\text{tot}}$  from the side of the piston and external load, N

с возвратно-поступательным движением поршня. На рис. 5 представлены переходные процессы электромеханического устройства при циклической деформации легкодеформируемой заготовки.

До  $t_1 = 1$  с и после  $t_2 = 9$  с поршень работает в режиме холостого хода. В момент времени  $t_{11} = 1,1$  с под поршень устанавливается заготовка толщиной 0,035 м. В течение восьми рабочих циклов происходит ударная деформация заготовки, при этом ее толщина уменьшается на 0,02 м.

Таким образом, разработана электромеханическая установка с возвратно-поступательным движением поршня и воздействием последнего на нагрузку с целью ее разрушения или деформации. Выполнена модель устройства в среде «Матлаб–Симулинк».

## ВЫВОДЫ

Применение в качестве источника питания генератора мощных импульсов тока с системой автоматического регулирования параметров позволяет с высоким быстродействием регулировать параметры процесса: усилие и пройденное поршнем расстояние.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов / В.Е. Громов, Л.Б. Зуев, Э.В. Козлов, В.Я. Целлермаер. – М.: Недра, 1996. – 290 с.
2. Electrically assisted forming: modeling and control / W.A. Salandro, J.J. Jones, C. Bunget, L. Mears, J.T. Roth. – Basel, Switzerland: Springer, 2014. – 376 p.
3. Jones J.J., Mears L., Roth J.T. Electrically-assisted forming of magnesium AZ31: effect of current magnitude and deformation rate on forgeability // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2012. Vol. 134. No. 3. Article 034504.
4. Bunget C., Salandro W.A., Mears L., Roth J.T. Energy-based modeling of an electrically-assisted forging process. – In book: 38th Annual North American Manufacturing Research Conference (NAMRC 38). – Kingston, ON, Canada, 2010. P. 647 – 654.
5. Hong S., Jeong Y., Chowdhury M.N., Chun D., Kim M., Han H.N. Feasibility of electrically assisted progressive forging of aluminum 6061-T6 alloy // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2015. Vol. 64. No. 1. P. 277 – 280.
6. Perkins T.A., Kronenberger T.J., Roth J.T. Metallic forging using electrical flow as an alternative to warm/hot working // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2007. Vol. 129. No. 1. P. 84 – 94.
7. Li X., Wang F., Li X., Zhu J., Tang G. Mg–3Al–1Zn alloy strips processed by electroplastic differential speed rolling // Materials Science Technology. 2016. Vol. 33. No. 2. P. 215 – 219.
8. Kozlov A.V., Mordyuk B.N., Chernyashevsky A.V. On the additivity of acoustoplastic and electroplastic effects // Materials Science and Engineering: A. 1995. Vol. 190. No. 1–2. P. 75 – 79.
9. Egea A.J.S., Rojas H.A.G., Celentano D.J., Peiro J.J. Mechanical and metallurgical changes on 308L wires drawn by electropulses // Materials and Design. 2016. Vol. 90. P. 1159 – 1169.
10. Zhang J., Tang G.Y., Yan Y.J., Fang W. Effect of current pulses on the drawing stress and properties of Cr17Ni6Mn3 and 4J42 alloys in the cold-drawing process // Journal of Materials Processing Technology. 2002. Vol. 120. No. 1–3. P. 13 – 16.
11. Ulutan D., Pleta A., Mears L. Electrically-assisted machining of titanium Alloy Ti-6Al-4V and nickel-based alloy IN-738: an investi-

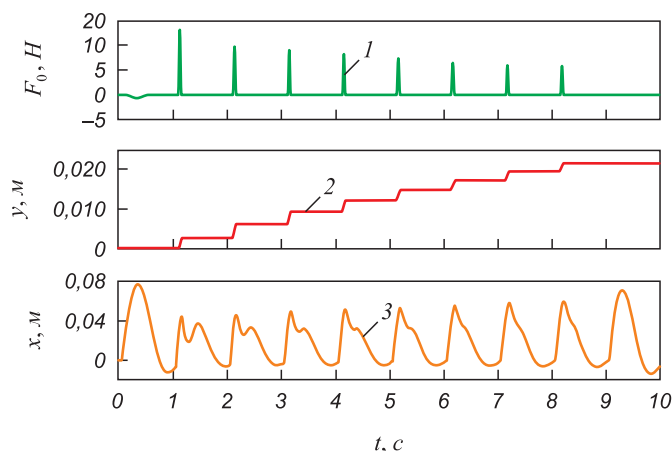


Рис. 5. Зависимости переходных процессов модели электромеханического устройства в процессе циклической деформации:

1 – усилие  $F_0$  воздействия на поршень со стороны нагрузки, Н; 2 – толщина  $y$  деформируемой заготовки, м; 3 – расстояние  $x$ , пройденное поршнем, м

Fig. 5. Dependences of transient processes of the model of electromechanical installation during cyclic deformation:

1 – force  $F_0$  of action on the piston from the load side, N; 2 – thickness  $y$  of the deformable billet, m; 3 – distance  $x$  travelled by the piston, m

gation // ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference. 2015. Paper No. MSEC2015-9465.

12. Jones E., Jones J. J., Mears L. Empirical modeling of direct electric current effect on machining cutting force // ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference. 2013. Paper No. MSEC2013-1229.
13. Hameed S., Rojas H.A.G., Egea A.J.S., Alberro A.N. Electroplastic cutting influence on power consumption during drilling process // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 87. No. 5–8. P. 1835 – 1841.
14. Zhang D., To S., Zhu Y.H., Wang H., Tang G.Y. Static electropulsing-induced microstructural changes and their effect on the ultra-precision machining of cold-rolled AZ91 alloy // Metallurgical and Materials Transactions A. 2012. Vol. 43. No. 4. P. 1341 – 1346.
15. Ji R., Liu Y., Zhang Y., Dong X., Chen Z., Cai B. Experimental research on machining characteristics of SiC ceramic with end electric discharge milling // Journal of Mechanical Science and Technology. 2011. Vol. 25. No. 6. P. 1535 – 1542.
16. Ruskiewicz B.J., Mears L. Electrically assisted compression of tungsten carbide and its implications for electrically assisted machining // ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference. 2016. Paper No. MSEC2016-8554.
17. Langer J., Hoffmann M.J., Guillon O. Direct comparison between hot pressing and electric field-assisted sintering of submicron alumina // Acta Materialia. 2009. Vol. 57. No. 18. P. 5454 – 5465.
18. Grasso S., Sakka Y., Maizza G. Electric current activated/ assisted sintering (ECAS): A review of patents 1906–2008 // Science and Technology of Advanced Materials. 2009. Vol. 10. No. 5. P. 053001.
19. Munir Z.A., Quach D.V., Ohyanagi M. Electric current activation of sintering: a review of the pulsed electric current sintering process // Journal of the American Ceramic Society. 2011. Vol. 94. No. 1. P. 1 – 19.
20. Skovron J.D., Ruskiewicz B.J., Mears L. Effect of electrical augmentation on the joining of Al6063-T5 using flow drill screws // ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference. 2016. Paper No. MSEC2016-8578.
21. Ferrando W.A. The Concept of electrically assisted friction stir welding (EAFSW) and application to the processing of various



- metals // Naval Surface Warfare Center, Bethesda, MD. 2008. Report No. NSWCCD-61-TR-2008/13.
22. Liu X., Lan S., Ni J. Electrically assisted friction stir welding for joining Al 6061 to TRIP 780 steel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 219. P. 112 – 123.
  23. Santos T.G., Miranda R.M., Vilaca P. Friction stir welding assisted by electrical joule effect // *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214. No. 10. P. 2127 – 2133.
  24. Santos T.G., Lopes N., Machado M., Vilaca P., Miranda R. Surface reinforcement of AA5083-H111 by friction stir processing assisted by electrical current // *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 216. P. 375 – 380.
  25. Stolyarov V.V. Deformability and nanostructuring of TiNi shape-memory alloys during electroplastic rolling // *Materials Science and Engineering. A*. 2009. Vol. 503. No. 1. P. 18 – 20.
  26. Ng M.K., Li L., Fan Z., Gao R.X., Smith E.F., Ehmann K.F., Cao J. Joining sheet metals by electrically-assisted roll bonding // *CIRP Annals*. 2015. Vol. 64. No. 1. P. 273 – 276.
  27. Bramley A.N., Jeswiet J., Micari F., Dufloy J., Allwood J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2005. Vol. 54. No. 2. P. 623 – 649.
  28. Neveux T., Ruskiewicz B.J., Grimm T., Roth J.T., Ragai I. Electrically assisted global springback elimination after single point incremental forming // *ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2016. Paper No. MSEC2016-8813.
  29. Ruskiewicz B.J., Roth J.T., Johnson D.H. Locally applied direct electric current's effect on springback of 2024-T3 aluminum after single point incremental forming // *ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2015. Paper No. MSEC2015-9429.
  30. Khal A., Ruskiewicz B.J., Mears L. Springback evaluation of 304 stainless steel in an electrically assisted air bending operation // *ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2016. Paper No. MSEC2016-8736.
  31. Grimm T.J., Roth J.T., Ragai I. Electrically assisted global springback elimination in AMS-T9046 titanium after single point incremental forming // *ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2016. Paper No. MSEC2016-8811.
  32. Patent 8,021,501 B2 US. Single point incremental forming of metallic materials using applied direct current / Roth J. Penn State Research Foundation, University Park, PA (US). 2011.
  33. Fan G., Gao L., Hussain G., Wu Z. Electric hot incremental forming: a novel technique // *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008. Vol. 48. No. 15. P. 1688 – 1692.
  34. Shi X., Gao L., Khalatbari H., Xu Y., Wang H., Jin L. Electric hot incremental forming of low carbon steel sheet: accuracy improvement // *Int. Journal of Advance Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 68. No. 1-4. P. 241 – 247.
  35. Bao W., Chu X., Lin S., Gao J. Experimental investigation on formability and microstructure of AZ31B alloy in electropulse-assisted incremental forming // *Materials and Design*. 2015. Vol. 87. P. 632 – 639.
  36. Honaripisheh M., Abdolhoseini M.J. Experimental and numerical investigation of forming force of Ti6Al4V sheet in electric hot incremental forming process of a conical part // *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 49. No. 2. P. 143 – 146.
  37. Xu D.K., Lu B., Cao T.T., Zhang H., Chen J., Long H., Cao J. Enhancement of process capabilities in electrically-assisted double sided incremental forming // *Materials and Design*. 2016. Vol. 92. P. 268 – 280.
  38. 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 // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 227. P. 88 – 95.
  39. Adams D., Jeswiet J. Single-point incremental forming of 6061-T6 using electrically assisted forming methods // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B - Journal of Engineering Manufacture*. 2014. Vol. 228. No. 7. P. 757 – 764.
  40. Valoppi B., Egea A.J.S., Zhang Z., Rojas H.A.G., Ghiotti A., Bruschini S., Cao J. A hybrid mixed double-sided incremental forming method for forming Ti6Al4V alloy // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 65. No. 1. P. 309 – 312.
  41. Nguyen-Tran H.D., Oh H.S., Hong S.T., Han H.N., Cao J., Ahn S.H., Chun D.M. A review of electrically-assisted manufacturing // *Int. Journal of Precision Engineering and Manufacturing. Green Technology*. 2015. Vol. 2. No. 4. P. 365 – 376.
  42. Guan L., Tang G., Chu P.K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals // *Journal Materials Research*. 2010. Vol. 25. No. 7. P. 1215 – 1224.
  43. Жмакин Ю.Д., Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Громов В.Е., Кузнецов В.А. Генератор мощных токов импульсов на запираемых тиристорах // *Промышленная энергетика*. 2010. № 6. С. 39 – 41.
  44. Жмакин Ю.Д., Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Громов В.Е., Кузнецов В.А. Частотно-регулируемый генератор мощных токовых импульсов с обратной связью по амплитуде // *Промышленная энергетика*. 2011. № 1. С. 28 – 31.
  45. Афанасьев А.П., Борисова С.Ю. Моделирование и анализ реакции электромеханического устройства на случайное механическое воздействие // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2016. № 4 (25). С. 9 – 18.
  46. Черных И.В. SIMULINK – среда для создания инженерных приложений. – М.: Диалог-МИФИ, 2004. – 491 с.
  47. Розанов Ю.К., Кравцов Д.В. Экспериментальное определение характеристик элементов электромеханических систем с использованием частотных методов // *Электротехника*. 2000. № 7. С. 9 – 13.
  48. Жмакин Ю.Д., Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е., Кузнецов В.А. Автоматизированная электровзрывная установка для повышения эксплуатационных характеристик материалов // *Промышленная энергетика*. 2011. № 6. С. 22 – 26.
  49. Кузнецов В.А., Громов В.Е., Кузнецова Е.С., Гагарин А.Ю., Косинов Д.А. Аппаратурное обеспечение электростимулированной обработки металлов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 2. С. 157 – 163.

Поступила в редакцию 22 сентября 2019 г.

После доработки 24 октября 2019 г.

Принята к публикации 15 ноября 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 9, pp. 755–762.

## ELECTROMECHANICAL INSTALLATION BASED ON HIGH POWER CURRENT PULSE GENERATOR

*V.A. Kuznetsov<sup>1</sup>, E.S. Kuznetsova<sup>1</sup>, O.A. Peregudov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia

<sup>2</sup>Omsk State Technical University, Omsk, Russia

**Abstract.** Electromechanical installation containing electromagnetic solenoid with a piston operating in reciprocating motion mode has been developed. Technologies with similar operating modes are widely used in various industries (mechanical engineering, metallurgy, mining, mechanics, robotics, as presses for forging and stamping, as well as jack-

hammers in crushing devices for coal, ore and rock). An economically effective generator of high power unipolar current pulses (with unique systems that allow adjustment of the main parameters in a wide range and with high speed: the frequency of pulse reproduction, amplitude) was used as a power source for electromechanical installation. The principle of operation of the generator is based on periodic discharge of pre-charged capacitors to a low-resistance active-inductive load. Generator contains power unit, consisting of a capacitor discharge unit for load; a generator control system (GCS), consisting of a capacitor charging unit (reversible thyristor converter with counter-parallel connected thyristor bridges); a recharge unit and an automatic control system of the ACS. According to the known equations, parameters of mechanical and electrical parts of the electromechanical installation were calculated: initial coordinate of the piston; magnetomotive force arising from change in inductance  $L(x)$ ; spring force; the force of resistance to the piston, proportional to the speed of its movement; force action on the piston; amplitude, duration and frequency of reproduction of current pulses. A simulation model of the installation has been developed in the MATLAB-SIMULINK environment. The graphs of transient processes during operation of the installation at idle and under load were built. Analysis of the operating modes of the installation was carried out. Developed electromechanical installation for influencing load with the aim of its destruction or deformation with a system of automatic control of parameters makes it possible to regulate process parameters with high speed: force and distance traveled by the piston.

**Keywords:** electromechanical installation, generator of high power current pulses, capacitor bank, charger, thyristor switch.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2020-9-755-762

## REFERENCES

- Gromov V.E., Zuev L.B., Kozlov E.V., Tsellermaer V.Ya. *Elektrostimulirovannaya plastichnost' metallov i spлавov* [Electrostimulated Plasticity of Metals and Alloys]. Moscow: Nedra, 1996, 290 p. (In Russ.).
- Salandro W.A., Jones J.J., Bunget C., Mears L., Roth J.T. *Electrically Assisted Forming: Modeling and Control*. Basel, Switzerland: Springer, 2014, 376 p.
- Jones J.J., Mears L., Roth J.T. Electrically-assisted forming of magnesium AZ31: Effect of current magnitude and deformation rate on forgeability. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2012, vol. 134, no. 3, article 034504.
- Bunget C., Salandro W.A., Mears L., Roth J.T. Energy-based modeling of an electrically-assisted forging process. In: *38<sup>th</sup> Annual North American Manufacturing Research Conference (NAMRC 38)*. Kingston, ON, Canada, 2010, pp. 647–654.
- Hong S., Jeong Y., Chowdhury M.N., Chun D., Kim M., Han H.N. Feasibility of electrically assisted progressive forging of aluminum 6061-T6 alloy. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2015, vol. 64, no. 1, pp. 277–280.
- Perkins T.A., Kronenberger T.J., Roth J.T. Metallic forging using electrical flow as an alternative to warm/hot working. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2007, vol. 129, no. 1, pp. 84–94.
- Li X., Wang F., Li X., Zhu J., Tang G. Mg–3Al–1Zn alloy strips processed by electroplastic differential speed rolling. *Materials Science Technology*. 2016, vol. 33, no. 2, pp. 215–219.
- Kozlov A.V., Mordukh B.N., Chernyashevsky A.V. On the additivity of acoustoplastic and electroplastic effects. *Materials Science and Engineering: A*. 1995, vol. 190, no. 1–2, pp. 75–79.
- Egea A.J.S., Rojas H.A.G., Celentano D.J., Peiro J.J. Mechanical and metallurgical changes on 308L wires drawn by electropulses. *Materials and Design*. 2016, vol. 90, pp. 1159–1169.
- Zhang J., Tang G.Y., Yan Y.J., Fang W. Effect of current pulses on the drawing stress and properties of Cr17Ni6Mn3 and 4J42 alloys in the cold-drawing process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, vol. 120, no. 1–3, pp. 13–16.
- Ulutun D., Pleta A., Mears L. Electrically-assisted machining of titanium alloy Ti-6Al-4V and nickel-based alloy IN-738: An investigation. *ASME Int. Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2015, paper no. MSEC2015-9465.
- Jones E., Jones J. J., Mears L. Empirical modeling of direct electric current effect on machining cutting force. *ASME Int. Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2013, paper no. MSEC2013-1229.
- Hameed S., Rojas H.A.G., Egea A.J.S., Alberro A.N. Electroplastic cutting influence on power consumption during drilling process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, vol. 87, no. 5–8, pp. 1835–1841.
- Zhang D., To S., Zhu Y.H., Wang H., Tang G.Y. Static electropulsing-induced microstructural changes and their effect on the ultra-precision machining of cold-rolled AZ91 alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012, vol. 43, no. 4, pp. 1341–1346.
- Ji R., Liu Y., Zhang Y., Dong X., Chen Z., Cai B. Experimental research on machining characteristics of SiC ceramic with end electric discharge milling. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2011, vol. 25, no. 6, pp. 1535–1542.
- Ruszkiewicz B. J., Mears L. Electrically assisted compression of tungsten carbide and its implications for electrically assisted machining. *ASME Int. Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2016, paper no. MSEC2016-8554.
- Langer J., Hoffmann M.J., Guillon O. Direct comparison between hot pressing and electric field-assisted sintering of submicron alumina. *Acta Materialia*. 2009, vol. 57, no. 18, pp. 5454–5465.
- Grasso S., Sakka Y., Maizza G. Electric current activated/ assisted sintering (ECAS): A review of patents 1906–2008. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2009, vol. 10, no. 5, pp. 053001.
- Munir Z.A., Quach D.V., Ohyanagi M. Electric current activation of sintering: A review of the pulsed electric current sintering process. *Journal of the American Ceramic Society*. 2011, vol. 94, no. 1, pp. 1–19.
- Skovron J.D., Ruszkiewicz B.J., Mears L. Effect of electrical augmentation on the joining of Al6063-T5 using flow drill screws. *ASME Int. Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2016, paper no. MSEC2016-8578.
- Ferrando W.A. *The Concept of Electrically Assisted Friction Stir Welding (EAFSW) and Application to the Processing of Various Metals*. Naval Surface Warfare Center, Bethesda, MD, 2008. Report no. NSWCCD-61-TR- 2008/13.
- Liu X., Lan S., Ni J. Electrically assisted friction stir welding for joining Al 6061 to TRIP 780 steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, vol. 219, pp. 112–123.
- Santos T.G., Miranda R.M., Vilaca P. Friction stir welding assisted by electrical joule effect. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, vol. 214, no. 10, pp. 2127–2133.
- Santos T.G., Lopes N., Machado M., Vilaca P., Miranda R. Surface reinforcement of AA5083-H111 by friction stir processing assisted by electrical current. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, vol. 216, pp. 375–380.
- Stolyarov V.V. Deformability and nanostructuring of TiNi shape-memory alloys during electroplastic rolling. *Materials Science and Engineering: A*. 2009, vol. 503, no. 1, pp. 18–20.
- Ng M.K., Li L., Fan Z., Gao R.X., Smith E.F., Ehmann K.F., Cao J. Joining sheet metals by electrically-assisted roll bonding. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2015, vol. 64, no. 1, pp. 273–276.
- Bramley A.N., Jeswiet J., Micari F., Dufloy J., Allwood J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2005, vol. 54, no. 2, pp. 623–649.
- Neveux T., Ruszkiewicz B.J., Grimm T., Roth J.T., Ragai I. Electrically assisted global springback elimination after single point incremental forming. *ASME Int. Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2016, paper no. MSEC2016-8813.
- Ruszkiewicz B.J., Roth J.T., Johnson D.H. Locally applied direct electric current's effect on springback of 2024-T3 aluminum after single point incremental forming. *ASME Int. Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2015, paper no. MSEC2015-9429.
- Khal A., Ruszkiewicz B.J., Mears L. Springback evaluation of 304 stainless steel in an electrically assisted air bending operation.

- ASME Int. Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2016, paper no. MSEC2016-8736.
31. Grimm T.J., Roth J.T., Ragai I. Electrically assisted global spring-back elimination in AMS-T-9046 titanium after single point incremental forming. *ASME Int. Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2016, paper no. MSEC2016-8811.
  32. Roth J. *Single Point Incremental Forming of Metallic Materials Using Applied Direct Current*. Patent US no. 8,021,501 B2. Penn State Research Foundation, University Park, PA (US), 2011.
  33. Fan G., Gao L., Hussain G., Wu Z. Electric hot incremental forming: A novel technique. *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008, vol. 48, no. 15, pp. 1688–1692.
  34. Shi X., Gao L., Khalatbari H., Xu Y., Wang H., Jin L. Electric hot incremental forming of low carbon steel sheet: Accuracy improvement. *Int. Journal of Advance Manufacturing Technology*. 2013, vol. 68, no. 1-4, pp. 241–247.
  35. Bao W., Chu X., Lin S., Gao J. Experimental investigation on formability and microstructure of AZ31B alloy in electropulse-assisted incremental forming. *Materials and Design*. 2015, vol. 87, pp. 632–639.
  36. Honarpisheh M., Abdolhoseini M.J. Experimental and numerical investigation of forming force of Ti6Al4V sheet in electric hot incremental forming process of a conical part. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2017, vol. 49, no. 2, pp. 143–146.
  37. Xu D.K., Lu B., Cao T.T., Zhang H., Chen J., Long H., Cao J. Enhancement of process capabilities in electrically-assisted double sided incremental forming. *Materials and Design*. 2016, vol. 92, pp. 268–280.
  38. 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. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016, vol. 227, pp. 88–95.
  39. Adams D., Jeswiet J. Single-point incremental forming of 6061-t6 using electrically assisted forming methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B – Journal of Engineering Manufacture*. 2014, vol. 228, no. 7, pp. 757–764.
  40. 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 Annals – Manufacturing Technology*. 2016, vol. 65, no. 1, pp. 309–312.
  41. Nguyen-Tran H.D., Oh H.S., Hong S.T., Han H.N., Cao J., Ahn S.H., Chun D.M. A Review of electrically-assisted manufacturing. *Int. Journal of Precision Engineering and Manufacturing. Green Technology*. 2015, vol. 2, no. 4, pp. 365–376.
  42. Guan L., Tang G., Chu P.K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals. *Journal Materials Research*. 2010, vol. 25, no. 7, pp. 1215–1224.
  43. Zhmakin Yu.D., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Gromov V.E., Kuznetsov V.A. High power current impulse generator on lockable thyristors. *Promyshlennaya energetika*. 2010, no. 6, pp. 39–41. (In Russ.).
  44. Zhmakin Yu.D., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Gromov V.E., Kuznetsov V.A. Frequency-controlled generator of high power current pulses with amplitude feedback. *Promyshlennaya energetika*. 2011, no. 1, pp. 28–31. (In Russ.).
  45. Afanas'ev A.P., Borisova S.Yu. Modeling and analysis of response of electromechanical device to accidental mechanical stress. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleikhe-ma*. 2016, no. 4 (25), pp. 9–18. (In Russ.).
  46. Chernykh I.V. *SIMULINK – sreda dlya sozdaniya inzhenernykh prilozhenii* [SIMULINK – environment for creating engineering applications]. Moscow: Dialog-MIFI, 2004, 491 p. (In Russ.).
  47. Rozanov Yu.K., Kravtsov D.V. Experimental determination of characteristics of electromechanical systems' elements using frequency methods. *Elektrotehnika*. 2000, no. 7, pp. 9–13. (In Russ.).
  48. Zhmakin Yu.D., Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Kuznetsov V.A. Automated electroexplosive installation for improvement of materials performance characteristics. *Promyshlennaya energetika*. 2011, no. 6, pp. 22–26. (In Russ.).
  49. Kuznetsov V.A., Gromov V.E., Kuznetsova E.S., Gagarin A.Yu., Kosinov D.A. Equipment provision of electrostimulated metal processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 2, pp. 157–163. (In Russ.).

#### 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.A. Kuznetsova**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Electrical Engineering, Electric Power and Industrial Electronics (kuzlena00@yandex.ru)

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

Received September 22, 2019

Revised October 24, 2019

Accepted November 15, 2019