

УДК 669.71:621.778

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОСТИМУЛИРОВАННОГО ВОЛОЧЕНИЯ

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

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

*Громов В.Е., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин
им. проф. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.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. Рассмотрена система регулирования параметров электростимулированного волочения (температуры в зоне деформации и усилия волочения), формирующая управляющий сигнал на генератор мощных импульсов тока, принцип действия которого основан на периодическом разряде предварительно заряженного конденсатора на низкоомную нагрузку. Для реализации возможности регулирования амплитуды импульса и увеличения его мощности вместо нерегулируемого источника постоянного тока в зарядном устройстве используются два неперекрывающихся, включенных последовательно и однонаправленно тиристорных преобразователя, которые позволяют получить регулируемое напряжение на силовых конденсаторах. С целью оптимизации процесса заряда конденсаторов выполнена двухконтурная система подчиненного регулирования параметров с внешним контуром регулирования напряжения и внутренним контуром регулирования тока заряда конденсаторов. В связи с высоким быстродействием переходных процессов при электростимулированном волочении (высокая степень нарастания температуры в зоне деформации из-за значительной величины токового импульса до 10 кА и частоты его воспроизведения до 400 Гц), регулирование параметров вручную практически невозможно. С целью повышения надежности и качества процесса электростимулированного волочения с использованием генератора мощных импульсов тока реализована система автоматического управления электростимулированным процессом волочения (САУЭСВ), которая содержит одноконтурную систему регулирования усилия волочения, а также задержанную обратную связь по температуре в зоне деформации. Зависимости изменения усилия волочения и температуры от частоты воспроизведения импульсов получены по результатам выполненных лабораторных исследований и расчетов с использованием известных и оригинальных методик. Для анализа режимов работы при электростимулированном волочении с использованием системы автоматического управления выполнена модель САУЭСВ в среде MATLAB-Simulink. Модель адекватна реальным параметрам, полученным в процессах исследования электропластического эффекта. Разработанная модель позволила усовершенствовать технические характеристики и режимы работы системы. Рассмотрены структурная схема, модель системы в среде MATLAB-Simulink, осциллограммы переходных процессов. Одноконтурная система автоматического управления усилием волочения с гибкой обратной связью по температуре в зоне деформации позволяет оптимизировать режимы работы, а также повысить надежность процесса электростимулированного волочения. Система рекомендована для применения при исследовании процессов электростимулированной деформации, а также для внедрения в производство при волочении проволоки.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, генератор импульсов, зарядное устройство, тиристорные преобразователи, мощный импульс тока, регулирование температуры и усилия, моделирование, переходные процессы.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-8-613-619

С появлением генераторов мощных импульсов тока, принцип действия которых заключается в разряде предварительно заряженных конденсаторов на низкоомную нагрузку, появилась возможность изучения изменения физических свойств металлов при токовом воздействии, а также возможность использования полученных результатов для внедрения в производство, в частности для электростимулированной обработки металлов давлением [1 – 3]. На рис. 1 приведена схема экономичного быстродействующего генератора импульсов,

выполненная с использованием тиристорных преобразователей [4]. Генератор формирует однополярный токовый импульс синусоидальной формы длительностью примерно 120 мкс амплитудой 8 – 10 кА.

Принцип действия генератора основан на периодическом разряде предварительно заряженного конденсатора на низкоомную нагрузку. Для снижения мощности генератора, потребляемой из сети 380 В, а также с целью регулирования в широких пределах напряжения заряда (амплитуды импульса) вместо нерегулируемого выпрямителя на диодах в схему введены управляемые тиристорные преобразователи VS1, VS2. При

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 16-32-60048 мол_а_дк).

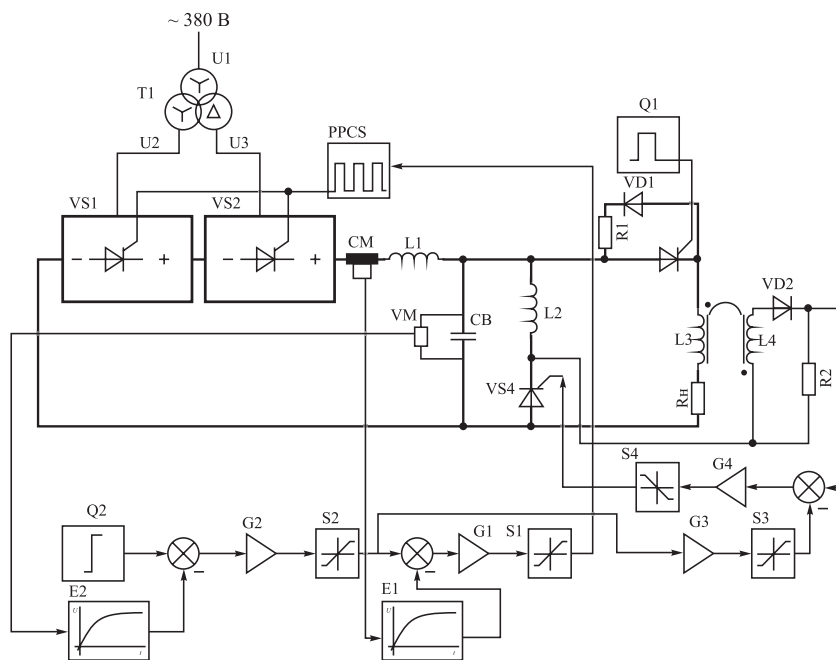


Рис. 1. Структурная схема генератора

Fig. 1. Block diagram of the generator

использовании источника питания на тиристорах генератор способен генерировать импульс с максимальной частотой воспроизведения до 300 – 400 Гц. Использование тиристорных преобразователей позволило вывести из схемы зарядного устройства токоограничивающий резистор R₃, что также повысило КПД и снизило мощность, потребляемую из сети переменного тока [5].

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. Ограничение максимального тока заряда осуществляется блоком ограничения регулятора напряжения S₂, блок ограничения регулятора тока S₁ позволяет устанавливать минимальное и максимальное значение угла регулирования тиристорного преобразователя [6]. Таким образом, в схеме генератора реализовано двухзонное регулирование мощности импульсов тока:

- за счет изменения частоты воспроизведения импульсов при стабилизации напряжения заряда конденсаторов;
- путем изменения напряжения заряда с помощью тиристорного преобразователя.

Задание на напряжение может быть подано вручную (от блока Q₁) или от сигнала технологического программируемого контроллера.

Первые попытки применить выявленный электропластический эффект в процессах обработки металлов давлением привели к ненадежной работе волочильного

стана из-за коренных отличий электростимулированного волочения от обычного:

- высокой степени нарастания температуры в зоне деформации из-за значительной величины токового импульса (до 10 кА) и частоты его воспроизведения (до 400 Гц);
- снижения усилия при воздействии на обрабатываемую заготовку импульсов тока.

Таким образом, частота воспроизведения импульсов тока должна соответствовать скорости движения заготовки. Например, если в момент начала движения заготовки подать импульсы тока, то температура заготовки может увеличиться до 1000 °С за доли секунды, что приведет к выходу из строя заготовки и волочильного инструмента еще до начала процесса разгона.

В связи с высоким быстродействием переходных процессов при электростимулированном волочении регулирование параметров вручную практически невозможно. Это привело к необходимости создания автоматизированных быстродействующих систем управления параметрами волочения [7].

На рис. 2 представлена схема системы регулирования параметров электростимулированного волочения (САУЭСВ): температуры в зоне деформации, усилия волочения. Схема САУЭСВ содержит одноконтурную систему регулирования усилия волочения, выполненную на базе регулятора усилия RU с ограничением, выходной сигнал которого поступает в блок SFI формирования управляющих импульсов.

Сформированные в блоке SFI управляющие импульсы, частота воспроизведения которых прямо пропорциональна выходному сигналу блока RU, поступают на

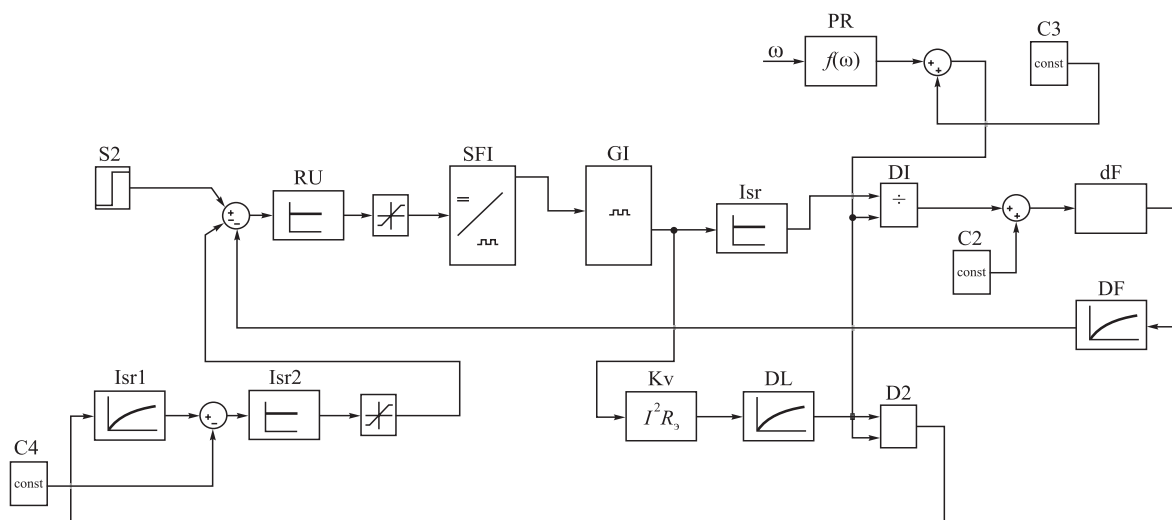


Рис. 2. Структурная схема САУЭСБ

Fig. 2. Structural diagram of EDACS

вход генератора мощных импульсов тока, схема и принцип действия которого представлены на рис. 1. Блок ограничения на выходе RU формирует максимальную и минимальную частоты воспроизведения импульсов. Два динамических звена Isr и dF моделируют эффект снижения усилия волочения проволоки при воздействии на нее мощных импульсов тока за счет электропластического эффекта (ЭПВ). Модель получена по результатам выполненных лабораторных исследований и расчетов с использованием оригинальных методик для измерения параметров тока, усилия и температуры в зоне деформации [8 – 12]. Обратная связь по усилию волочения выполнена на базе блока DF.

Блок задания усилия S2 формирует сигнал, пропорциональный усилию, полученному экспериментальным путем при электропластическом волочении проволоки определенной марки и сечения с определенной скоростью.

Одним из факторов, присущих электропластическому эффекту, должна быть низкая температура в зоне деформации: обычно не более 250 – 300 °С. Увеличение температуры приводит чаще всего к изменению свойств обрабатываемого материала как при пластической деформации с нагревом. При этом изменение пластичности металла подчиняется другим физическим законам. Таким образом, при электростимулированном волочении необходимо следить за температурой в зоне деформации, не допуская ее превышения. С этой целью в схему САУЭСБ введена задержанная обратная связь по температуре. Температура t_0 определяется в соответствии с выражением

$$P_3 t = C m \tau^0 - P_{и} - P_{к} - P_{т},$$

где $P_3 = I_{ск}^2 R_3$ – мощность, прикладываемая к обрабатываемой заготовке, $I_{ск}^2$ – среднеквадратичный ток, про-

ходящий через заготовку при воздействии на обрабатываемый материал импульсов переменной частоты с постоянной амплитудой 8 – 10 кА; R_3 – эквивалентное активное сопротивление обрабатываемой проволоки с учетом скин-эффекта; τ^0 – температура в зоне деформации; C – постоянная; m – масса обрабатываемой проволоки (между контактами); t – текущее время; $P_{и}$, $P_{к}$ и $P_{т}$ – потери мощности на излучение, конвекцией и теплопроводностью [13].

В блоке Kv формируется сигнал, пропорциональный мощности P_3 , а в блоке DL – температуре в зоне деформации τ^0 . Блок DL реализует инерционную часть изменения температуры в процессе изменения скорости электродвигателя при приложении задающих и возмущающих воздействий. Уставка по температуре определяет начало действия отсечки и реализуется в блоке С4. Задержанная обратная связь (отсечка) по температуре τ^0 позволяет поддерживать температуру в зоне деформации заданной величины за счет изменения частоты воспроизведения токовых импульсов генератора.

Известно, что при движении проволоки эффективность электропластического эффекта, а также температура в зоне деформации будут уменьшаться в связи с уменьшением времени нахождения деформируемой части проволоки под действием тока. Для учета этого явления в схему введены блоки преобразования PR и деления D1, D2. С целью упрощения САУЭСБ зависимости усилия и температуры от частоты импульсов тока в процессах движения проволоки линеаризованы.

Для анализа режимов работы при электростимулированном волочении проволоки с использованием системы автоуправления и ее совершенствования выполнена модель системы автоматизированного управления процессом электропластического волочения в среде MATLAB-Simulink (рис. 3).

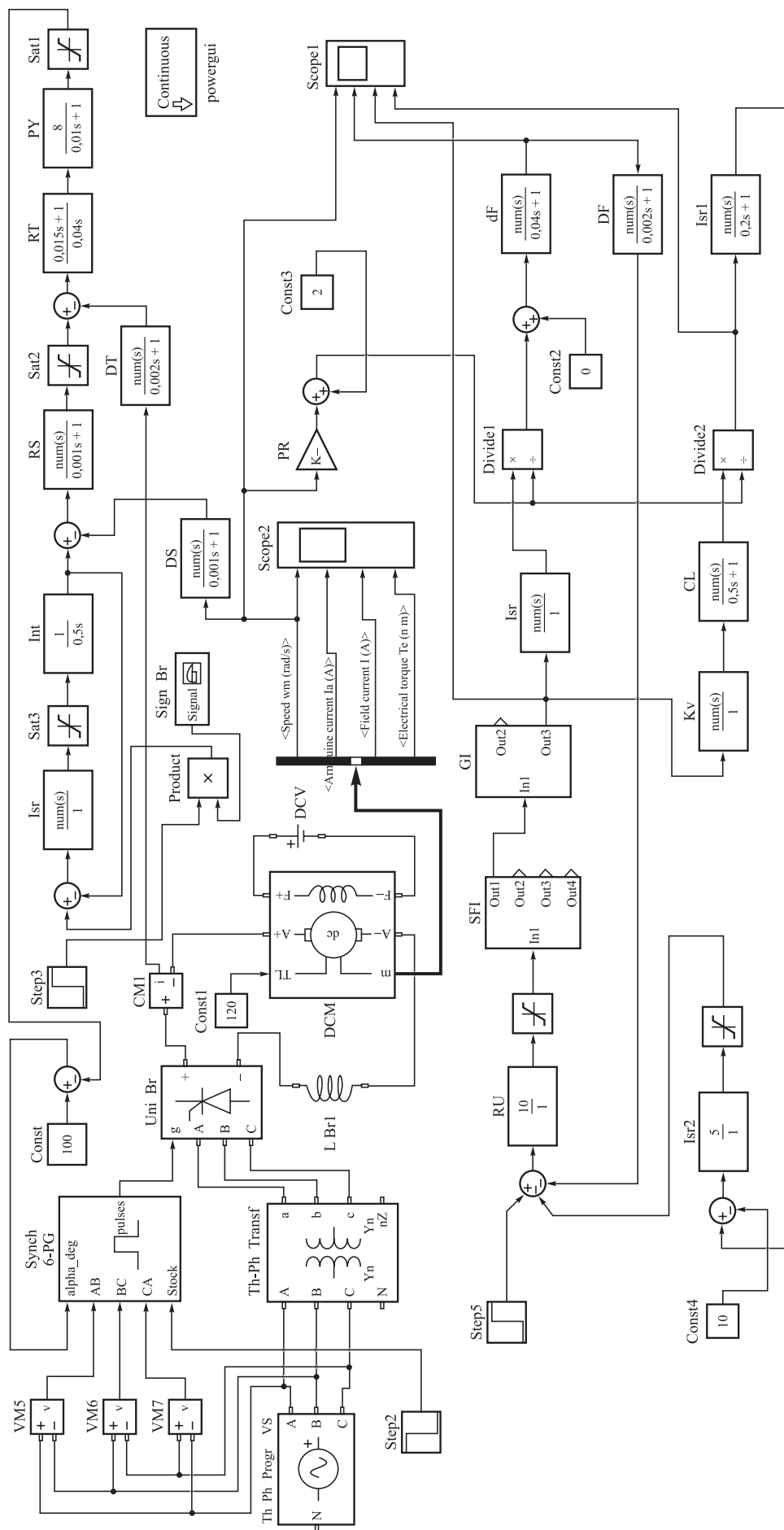


Рис. 3. Модель системы автоматического управления процессом электростимулированного волочения

Fig. 3. Model of the automatic control system of electrostimulated drawing process

Схема содержит модели:

– электропривода постоянного тока с системой подчиненного регулирования основных параметров электропривода (скорости, темпа изменения скорости и ограничения максимального момента – блоки Synch6-PG, Th-Ph Trans, VM5 – VM7, Uni-Br, K, Int, RS, RT, PY, DS, DT);

– генератора мощных импульсов тока с системой формирования управляющих импульсов (рис. 1, блоки SFI, GI);

– системы САУЭСВ (блоки RU, Isr, Isr1, Isr2, D1, D2, dF, DF, PR).

Переходные процессы ЭСВ фиксировались на осциллографе Scope1.

На рис. 4 показан процесс изменения параметров САУ при разгоне электропривода. Импульсы нарастают в функции изменения скорости электропривода, при этом отсутствуют недопустимое повышение усилия волочения и недопустимая температура в зоне деформации заготовки.

На рис. 5 показана реакция САУЭСВ при возмущающем воздействии на электропривод (например, при снижении напряжения сети), что привело к снижению скорости электродвигателя.

Неуправляемое снижение скорости электродвигателя приводит к увеличению температуры до начала

действия отсечки. При этом температура стабилизируется на заданном (максимальном) уровне при незначительном снижении усилия волочения. При восстановлении требуемой скорости оптимальный процесс электростимулированного волочения восстанавливается.

Выводы. Создание экономичных быстродействующих тиристорных генераторов мощных импульсов тока с широким диапазоном регулирования амплитуды и частоты воспроизведения импульсов дало возможность применять их для изучения электропластического эффекта в лабораторных условиях, а также использовать в производстве, в частности, при электростимулированном волочении проволоки. Для повышения надежности и безотказности процесса электростимулированного волочения, а также для оптимизации его режимов разработана одноконтурная система автоматического управления усилием волочения с гибкой обратной связью по температуре в зоне деформации (САУЭСВ), выполнен синтез системы. Выполнена модель разработанной системы, произведен анализ устойчивости, статических и динамических режимов работы. Схема САУЭСВ рекомендована для применения при исследовании процессов электростимулированной деформации, а также для внедрения в производство при волочении проволоки.

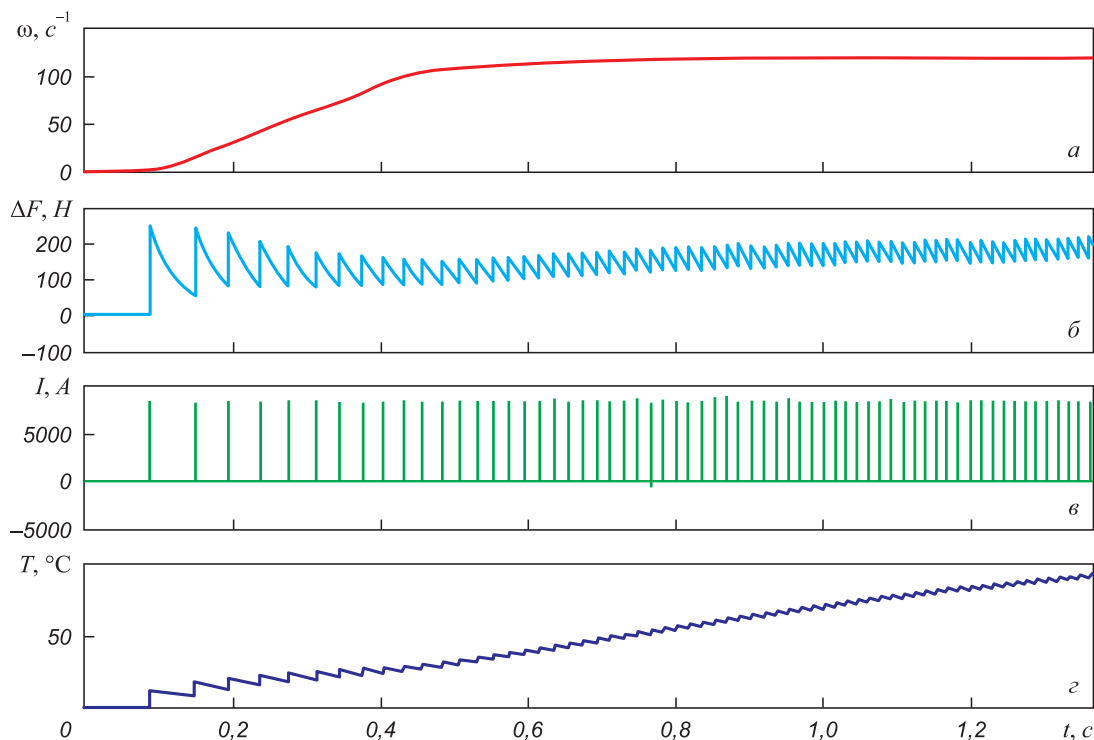


Рис. 4. Переходные процессы в САУЭСВ в процессе разгона электропривода:

a – скорость электродвигателя, рад/с; *б* – эффект снижения усилия волочения ΔF (электропластический эффект) по отношению к обычному волочению, кГ; *в* – амплитуда импульсов тока, А; *г* – температура в зоне деформации, °С

Fig. 4. Transients in EDACS during motor actuator acceleration:

a – motor speed, rad/s; *б* – effect of reducing the drawing force ΔF (electroplastic effect) in relation to the usual drawing, kg; *в* – amplitude of current pulses, A; *г* – temperature in the deformation zone, °C

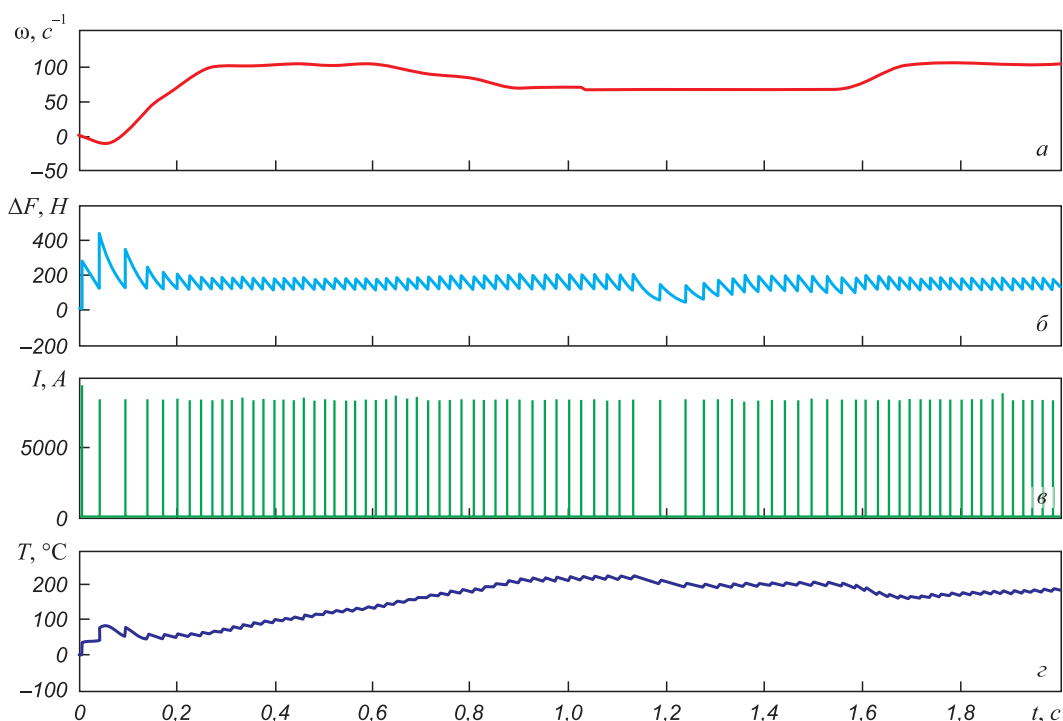


Рис. 5. Реакция САУЭСВ при возмущающем воздействии:

a – скорость электродвигателя, рад/с; *б* – эффект снижения усилия волочения, кГ; *в* – амплитуда импульсов тока, А; *г* – температура в зоне деформации, °С

Fig. 5. Reaction of EDACS at perturbing effect:

a – motor speed, rad/s; *б* – effect of reducing the drawing force, kg; *в* – amplitude of current pulses, A; *г* – temperature in the deformation zone, °C

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Троицкий О.А., Лихтман В.И. Об анизотропии действия электронного и α -облучения на процесс деформации монокристаллов цинка в хрупком состоянии // ДАН СССР. Техническая физика. 1963. Т. 148. № 2. С. 332 – 334.
- Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. A study of the electroplastic effect in metals // Scripta Metallurgica. 1978. Vol. 12. No. 11. P. 1063 – 1068. А.с. 884092 СССР. Генератор мощных импульсов тока / В.А. Кузнецов, В.Е. Громов, В.П. Симаков; заявл. 26.03.1980; опубл. 21.07.1981.
- Кузнецов В.А., Громов В.Е., Перетьяко В.Н. Применение генератора мощных импульсов тока при электростимулированном волочении // Промышленная энергетика. 1986. № 10. С. 17 – 19.
- Жмакин Ю.Д., Романов Д.А., Рыбьянец В.А. Экономичный способ регулирования электропотребления с применением генератора мощных токовых импульсов // Промышленная энергетика. 2012. № 4. С. 14 – 16.
- Кузнецов В.А., Громов В.Е., Кузнецова Е.С., Гагарин А.Ю. Аппаратурное обеспечение электростимулированной обработки металлов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 2. С. 157 – 163. А.с. 12677668 СССР. Система управления устройством для обработки давлением металлической заготовки / В.А. Кузнецов, В.Е. Громов; заявл. 1.02.1985; опубл. 01.07.1986.
- Asai S. Recent development and prospect of electromagnetic processing of materials // Sci. and Tech. of Advanced Materials. 2000. No. 1. P. 191 – 200.
- Li X., Tang G., Kuang J., Li X., Zhu J. Effect of current frequency on the mechanical properties, microstructure and texture evolution in AZ31 magnesium alloy strips during electroplastic rolling // Mater. Sci. Eng: A. 2014. No. 612. P. 406 – 413.
- Li X., Wang F., Li X., Tang G., Zhu J. Improvement of formability of Mg-3Al-1Zn alloy strip by electroplastic-differential speed rolling // Mater. Sci. Eng: A. 2014. No. 618. P. 500 – 504.
- Liu D., Li X., Tang G., Chen L., Wang H. An ultrasonic-electric surface modification of stainless steel treatment // Materials Science and Technology. 2014. Submission. Vol. 31. No. 13A. P. 1572 – 1576.
- Ye Y., Li X., Tang G. The effect of electropulsing assisted ultrasonic impact treatment on the mechanical properties and microstructure evolution of steel // Materials Science and Technology. 2014. Submission. Vol. 31. No. 13A. P. 1583 – 1588.
- Guan L., Tang G., Chu P.K., Jiang Y., J. Enhancement of ductility in Mg-3Al-1Zn alloy with tilted basal texture by electropulsing // Mater. 2009. Res. 24. P. 3674 – 3679.
- Guan L., Tang G., Chu P.K., J. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals // Mater. Res. 2010. No. 25. P. 1215 – 1224.
- Xu Z., Tang G., Tian S., Ding F., Tian H., J. Research of electroplastic rolling of AZ31 Mg alloy strip // Mater. Process. Technol. 2007. Vol. 182. P. 128–133.
- Столяров В.В., Угурчиев У.Х. Электроимпульсное стимулирование деформируемости никелида титана при прокатке с током // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 2. С. 41 – 44.
- Терентьев В.Ф., Столяров В.В., Слизов А.К., Сиротинкин В.П., Рыбальченко О.В. Особенности электропластического деформирования трип-стали // Деформация и разрушение материалов. 2016. № 2. С. 35 – 41.
- Столяров В.В. Роль структурного измельчения и импульсного тока в механическом поведении сплава с памятью формы // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 1. С. 58 – 64.
- Столяров В.В. Деформационное поведение ультрамелкозернистых материалов при растяжении с током // Изв. вуз. Физика. 2015. Т. 58. № 6. С. 57 – 60.
- Коврев Г.С. Электроконтактный нагрев при обработке цветных металлов. – М.: Металлургия, 1975. С. 30 – 35.

Поступила 29 ноября 2017 г.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR ELECTROSTIMULATED DRAWING PROCESS

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

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. The system for electrostimulated drawing parameters control (temperature in deformation zone and drawing force) is considered, which forms a control signal to generator of high power current pulses. Its principle is based on periodic discharge of pre-charged capacitor to low-resistance load. To provide possibility of adjusting pulse amplitude and increasing its power, two non-reversible, serially and unidirectionally connected thyristor converters are used, instead of unregulated DC power source in charger, that allow obtaining adjustable voltage on power capacitors. In order to optimize capacitor charging process, two-circuit system of subordinate parameter control was carried out with an external voltage regulation loop and an internal circuit regulating charging current of the capacitors. Due to high speed of transient processes at electrostimulated drawing (a high degree of temperature rise in deformation zone due to considerable current pulse value up to 10 kA and its reproduction frequency up to 400 Hz), manual control is almost impossible. In order to increase reliability and quality of process of electrostimulated drawing using high power current pulse generator, an automatic control system for electrostimulated drawing process (EDACS) is implemented. This system contains a single-loop system for adjusting the drawing force, as well as delayed temperature feedback in deformation zone. Dependences of change in drawing force and temperature on frequency of reproduction of pulses were obtained from the results of laboratory studies and calculations applying known and original techniques. For analysis of operating modes for electrostimulated drawing using automatic control system, the EDACS model was implemented in MATLAB-Simulink environment. The model is adequate to real parameters obtained in electroplastic effect investigations. The developed model allowed improvement of technical characteristics and operating modes of the system. Functional chart, model of system in MATLAB-Simulink environment, oscillograms of transient processes are considered. A single-loop automatic control system of drawing force with flexible temperature feedback in deformation zone allows optimization of operation modes as well as increase in reliability of electrostimulated drawing process. The system may be recommended for the research of electrostimulated deformation processes, it may also be introduced in production at wire drawing.

Keywords: automatic control system, pulse generator, charger, thyristor converters, high power current pulse, temperature and power regulation, simulation, transient process.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-8-613-619

REFERENCES

1. Troitskii O.A., Likhman V.I. On the anisotropy of electronic and α -irradiation effect on process of deformation of zinc single crystals in a fragile state. *DAN SSSR. Tekhnicheskaya fizika*. 1963, vol. 148, no. 2, pp. 332–334. (In Russ.).
2. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. A study of the electroplastic effect in metals. *Scripta Metallurgica*. 1978, vol. 12, no. 11, pp. 1063–1068.
3. Kuznetsov V.A., Gromov V.E., Simakov V.P. *Generator moshchnykh impul'sov toka* [Generator of high power current pulses]. Certificate of authorship USSR no. 884092. *Byulleten' izobretenii*. 1980. (In Russ.).
4. Kuznetsov V.A., Gromov V.E., Perelyat'ko V.N. The use of high power current pulse generator with electrostimulated drawing. *Promyshlennaya energetika*. 1986, no. 10, pp. 17–19. (In Russ.).
5. Zhmakin Yu.D., Romanov D.A., Rybyanets V.A. Efficient way to regulate power consumption using high power current pulse generator. *Promyshlennaya energetika*. 2012, no. 4, pp. 14–16. (In Russ.).
6. Kuznetsov V.A., Gromov V.E., Kuznetsova E.S., Gagarin A.Yu. Equipment provision of electrostimulated metal processing. *Izves-*

tiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2017, vol. 60, no. 2, pp. 157–163. (In Russ.).

7. Kuznetsov V.A., Gromov V.E. *Sistema upravleniya ustroystvom dlya obrabotki davleniem metallicheskoj zagotovki* [Control system for the metal billet forming device]. Certificate of authorship USSR no. 12677668. *Byulleten' izobretenii*. 1985. (In Russ.).
8. Asai S. Recent development and prospect of electromagnetic processing of materials. *Sci. and Tech. of Advanced Materials*. 2000, no. 1, pp. 191–200.
9. Li X., Tang G., Kuang J., Li X., Zhu J. Effect of current frequency on the mechanical properties, microstructure and texture evolution in AZ31 magnesium alloy strips during electroplastic rolling. *Mater. Sci. Eng. A*. 2014, no. 612, pp. 406–413.
10. Li X., Wang F., Li X., Tang G., Zhu J. Improvement of formability of Mg-3Al-1Zn alloy strip by electroplastic-differential speed rolling. *Mater. Sci. Eng. A*. 2014, no. 618, pp. 500–504.
11. Liu D., Li X., Tang G., Chen L., Wang H. An ultrasonic-electric surface modification of stainless steel treatment. *Materials Science and Technology*. 2014, Submission, vol. 31, no. 13A, pp. 1572–1576.
12. Ye Y., Li X., Tang G. The effect of electropulsing assisted ultrasonic impact treatment on the mechanical properties and microstructure evolution of steel. *Materials Science and Technology*. 2014, Submission, vol. 31, no. 13A, pp. 1583–1588.
13. Guan L., Tang G., Chu P.K., Jiang Y., J. Enhancement of ductility in Mg-3Al-1Zn alloy with tilted basal texture by electropulsing. *Mater. Res*. 2009, vol. 24, pp. 3674–3679.
14. Guan L., Tang G., Chu P.K., J. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals. *Mater. Res*. 2010, vol. 25, pp. 1215–1224.
15. Xu Z., Tang G., Tian S., Ding F., Tian H., J. Research of electroplastic rolling of AZ31 Mg alloy strip. *Mater. Process. Technol*. 2007, vol. 182, pp. 128–133.
16. Stolyarov V.V., Ugurchiev U.Kh. Electropulse stimulation of titanium nickelide deformability during rolling with current. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2016, no. 2, pp. 41–44. (In Russ.).
17. Terent'ev V.F., Stolyarov V.V., Slizov A.K., Sirotinkin V.P., Rybalchenko O.V. Specifics of TRIP-steel electroplastic deformation. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2016, no. 2, pp. 35–41. (In Russ.).
18. Stolyarov V.V. The role of structural grinding and pulsed current in mechanical behavior of alloy with the shape memory. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*. 2015, no. 1, pp. 58–64. (In Russ.).
19. Stolyarov V.V. Deformation behavior of ultrafine-grained materials under tension with current. *Russian Physics Journal*. 2015, vol. 58, no. 6, pp. 803–807.
20. Kovrev G.S. *Elektrokontaktnyi nagrev pri obrabotke tsvetnykh metallov* [Electrocontact heating in non-ferrous metals processing]. Moscow: Metallurgiya, 1975, pp. 30–35. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was performed within the RFBR grant (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)

E.S. Kuznetsova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Electrical Engineering, Electric Power and Industrial Electronics (kuzlenna00@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)

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

Received November 29, 2017