

УДК 621.365

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-86-92

Разработка источника питания управляющего электрода технологической электронной пушки

Н.М. Вахмянин, А.В. Щербаков, Д.А.Гапонова

Статья посвящена разработке модели модулятора напряжения источника питания управляющего электрода электронно-лучевой пушки в рамках проекта по созданию научно-технических основ управления процессом электронно-лучевого аддитивного формообразования. В данной технологии обычно используются электронные пучки высокой мощности для последовательного наплавления материалов в форме металлической проволоки. Управление электрическим током электронного луча осуществляется импульсным воздействием пучка на оплавливаемую металлическую проволоку. Разработка технологии активно ведется отечественными и зарубежными фирмами, однако четкие критерии выбора параметров импульсной модуляции электронного пучка не определены и зависят от обрабатываемого материала.

Представлено краткое описание используемых современных технических решений для электропитания и управления мощностью электронного пучка электронно-лучевой пушки. Проведен анализ работы системы импульсной модуляции тока электронного луча установки с целью определения оптимальных параметров и режимов работы модулятора электрического напряжения. Разработана и предложена модель модулятора, позволяющая оценивать параметры импульсного напряжения, переходные процессы на фронтах и спадах импульсов напряжения различной скважности на выходе модулятора и подбор правильной элементной базы. Моделирование электрической схемы модулятора напряжения источника питания управляющего электрода электронно-лучевой пушки выполнено с помощью пакета моделирования NI Multisim 11.0.

Ключевые слова: электронно-лучевая установка, модулятор электрического напряжения, импульсная модуляция, EBF_3 -технология.

Для цитирования: Вахмянин Н.М., Щербаков А.В., Гапонова Д.А. Разработка источника питания управляющего электрода технологической электронной пушки // Вестник МЭИ. 2019. № 1. С. 86—92. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-86-92.

Development of a Power Supply Source for the Technological Electron-beam Gun Control Electrode

N.M. Vakhmyanin, A.V. Shcherbakov, D.A. Gaponova

The article deals with developing the model of a power supply voltage modulator for the electron-beam gun control electrode within the framework of the project aimed at elaborating scientific and technical fundamentals of controlling the electron beam additive form shaping process. Generally, this technology involves the use of high-power electron beams for sequentially fusing materials in the form of a metal wire. The electron beam electric current is controlled by applying the beam impulse on the fused metal wire. Despite the fact that active efforts are being taken by Russian and foreign companies for developing the technology, clear criteria for choosing the electron beam pulsed modulation parameters have not been determined and depend on the material being processed.

The current technical solutions used for energizing the gun's electron beam and controlling its power are briefly described. The electron beam current pulse modulation system is analyzed with a view to determine the electric voltage modulator optimum parameters and operating modes. A modulator model has been developed and proposed, using which it is possible to evaluate the impulse voltage parameters, to estimate the transients at the front and trailing edges of the modulator output voltage pulses with different duty cycles, and to select the proper components. The electrical circuit of the power supply voltage modulator for the electron-beam gun control electrode was simulated using the NI Multisim 11.0 simulation package.

Key words: electron-beam installation, electric voltage modulator, pulse modulation, EBF_3 -technology.

For citation: Vakhmyanin N.M., Shcherbakov A.V., Gaponova D.A. Development of a Power Supply Source for the Technological Electron-beam Gun Control Electrode. MPEI Vestnik. 2019;1:86—92. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-86-92.

Введение

Аддитивные технологии, применяемые в разработке моделей, прототипов и деталей для различных отраслей промышленности развиваются активными темпами. Стоит отметить активную работу над технологией электронно-лучевой наплавки, позволяющей создавать различные технологические детали и инструменты в соответствии с САД-моделями путем сплошного оплавления металлической проволоки (*EBF₃*-технология) [1, 2].

Достоинством электронного луча является его малая инерционность. Это позволяет вести точную регулировку мощности, положения и фокусировки луча на поверхности изделия, осуществлять быстрое управление этими параметрами. При статическом воздействии электронного пучка на обрабатываемый материал проволоки могут проявляться дефекты при оплавлении металла: пикообразная глубина проплавления, наличие пористости или несплавлений в зоне плавки. Возможны отклонения электронного луча от заданной траектории из-за остаточных или наведенных магнитных полей. Поэтому в электронно-лучевой технологии применяют импульсное воздействие луча на оплавливаемый материал, при котором теплопередача дополнительно регулируется частотой и длительностью воздействия пучка электронов [3, 4]. Это позволяет получить более однородную структуру по глубине оплавливаемой проволоки.

Ввиду отсутствия полных данных о колебательных перемещениях луча в канале проплавления выбор параметров частоты и длительности воздействия пучка электронов в каждом отдельном случае затруднителен. Для решения данной задачи необходим анализ параметров импульсного электронного пучка электронов в электронно-лучевой установке (ЭЛУ), а также процессов в источниках электропитания и электронной пушке при импульсном регулировании мощности луча.

Способы управления электрическим током пучка электронно-лучевой пушки

В ЭЛУ используется ускоряющее напряжение, достигающее значения десятков киловольт, поэтому к системе электропитания электронно-лучевых установок предъявляют жесткие требования стабильности работы. Даже кратковременные изменения параметров процесса (тока электронного луча, ускоряющего напряжения электронов) могут отразиться на качестве проплавления материала (глубине, ширине, форме проплавления).

Прогресс полупроводниковой силовой электроники в последние десятилетия привел к появлению мощных MOSFET- и IGBT-транзисторов, специально предназначенных для применения в преобразовательной технике. Активно ведутся работы по проектированию источников электропитания с применением инверторов напряжения (рис. 1).

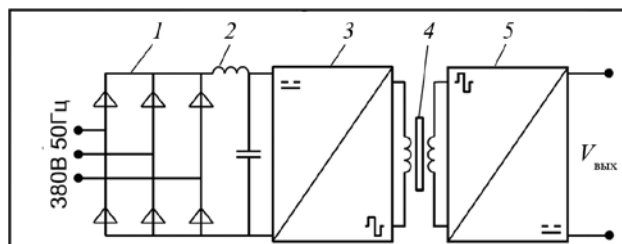


Рис. 1. Структурная схема силового преобразователя с преобразованием частоты:

1 — сетевой выпрямитель; 2 — фильтр; 3 — преобразователь частоты; 4 — транзистор; 5 — выходной выпрямитель

Основные преимущества таких источников — меньшие масса и габариты трансформаторов, низкая инерционность регулирования, меньшая запасенная энергия, высвобождаемая при пробоях, а также возможность построения схем инверторов и трансформаторно-выпрямительных устройств по модульному принципу с использованием унифицированных элементов [5].

Важный аспект проведения прецизионных аддитивных технологий с использованием электронного пучка — управление его током (мощностью).

Согласно практике эксплуатации электронно-лучевых установок, управление мощностью электронного пучка осуществляется путем подачи напряжения на управляющий электрод (УЭ) ЭЛУ [3, 4]. Такой способ наиболее удобен при регулировании тока, стабилизации его заданного значения, импульсной модуляции и плавном уменьшении при прекращении технологического процесса.

Однако при увеличении отрицательного электрического напряжения смещения на УЭ траектории электронов вблизи катода электронной пушки искажаются. Это ухудшает фокусировку пучка.

Таким образом, основными задачами при разработке модулятора электрического напряжения электронной пушки являются правильный выбор параметров модуляции, расчет системы автоматического управления (САУ) модулятора и определение его элементной базы, гарантирующей надежность работы ЭЛУ.

Импульсная модуляция тока электронного луча

Импульсная модуляция тока электронного пучка электронно-лучевой пушки позволяет значительно уменьшить общее время воздействия луча на обрабатываемый материал.

В процессе электронно-лучевого аддитивного формообразования важно, чтобы слои оплавливаемого материала-проволоки накладывались на подложку, а впоследствии и друг на друга, равномерно, без специфических дефектов (наличия полостей или несплавлений) в объеме слоя наплавливаемого металла. Импульсная модуляция тока пучка используется для устранения подобных дефектов.

В настоящее время опубликовано большое количество работ отечественных и зарубежных авторов по определению критериев выбора оптимальных параметров импульсной модуляции тока для установок электронно-лучевой обработки материалов, однако четкие критерии выбора параметров импульсной модуляции не определены [3, 4].

Благодаря активному развитию систем электропитания и управления электронным лучом, отечественными и зарубежными фирмами разработаны аспекты создания электрооборудования электронно-лучевых систем [6 — 8], но, к сожалению, вопросам управления током пучка не уделено достаточного внимания.

Анализ современных работ и исследований [3—5, 9, 10], посвященных методу импульсной модуляции тока электронного пучка, позволил выделить диапазон параметров импульсов тока луча: частота импульсной модуляции тока луча — не более 1000 Гц; коэффициент заполнения импульсного сигнала — 0...60%; неустойчивости силы тока электронного пучка и ускоряющего напряжения — не более $\pm 1\%$; длительность фронта и спада импульса на частоте 50 Гц — не более 3 мс.

Указанные параметры импульсного сигнала управляющего электрода предъявляют жесткие требования к проектированию модулятора.

Разработка модели модулятора напряжения

В рамках проекта создания научно-технических основ управления процессом электронно-лучевого аддитивного формообразования на кафедре электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий (ЭШПЭ) НИУ «МЭИ» авторами статьи ведется работа над проектированием импульсного модулятора электрического напряжения (ИМН) источника электропитания и системы его управления. Он необходим для инвертирования высокого постоянного электрического напряжения источника электропитания управляющего электрода электронно-лучевой пушки. Схема модели

импульсного модулятора и ее состав изображены на рис. 2.

Построение модели проводилось с использованием пакета моделирования NI Multisim 11.0. Схема эмулятора отрицательной обратной связи по напряжению и току источника ускоряющего напряжения ЭЛУ, работающего совместно с датчиком сигнала управления инвертора электрического напряжения модулятора, показана на рис. 3.

На неинвертирующий вход 3 ОУ $U1A$ подается постоянное напряжение через делитель на резисторах $R1$ и $R2$, а на инвертирующий вход 2 — напряжение резистора $R5$, регулируемое через потенциометр $R4$.

Параметры резисторов $R5$, $R6$ подобраны таким образом, чтобы коэффициент усиления схемы составлял 1,65 и гарантировал максимальный коэффициент заполнения сигнала на выходе компаратора $U2$ в 90%.

Напряжение с выхода операционного усилителя (использовался AD823AN) поступает на вход «+» схемы компаратора и сравнивается с пилообразным сигналом, амплитуда которого выбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальное время импульса сигнала напряжения.

Параметры потенциометра $R4$, обеспечивающие различное заполнение импульсного сигнала на выходе датчика сигнала, указаны в табл. 1.

Схема разделителя сигнала представлена на рис. 4. Импульсный сигнал от датчика поступает на два логических инвертора $U3$ и $U4$, которые инвертируют его и выдают на МОП-транзисторы $Q1$ и $Q2$.

Когда на вход транзистора приходит логическая единица, т. е. 5 В, силовые ключи отпираются, и напряжение источника $V5$ подается на «землю». В ином случае электрическое напряжение 12 В выдается на схему инвертора напряжения.

Таким образом, применение транзисторов $Q1$, $Q2$ позволяет инвертировать обратно в исходную форму выходные импульсные сигналы элементов «НЕ», $U3$ и $U4$, с уровнем электрического напряжения источника постоянного тока $V5$.



Рис. 2. Функциональная схема модели модулятора высокого напряжения смещения

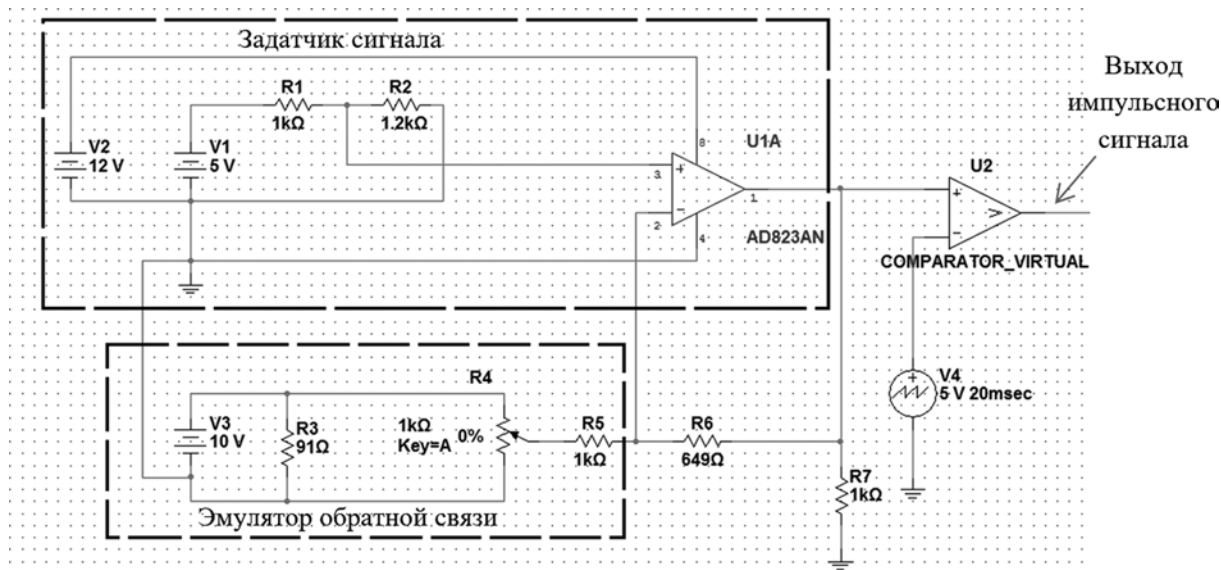


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная эмулятора отрицательной обратной связи и задатчика сигнала, разработанная в программе компьютерного моделирования NI Multisim 11.0

Таблица 1

Заполнение импульсного сигнала на выходе задатчика

Процент открытия потенциометра R4, %	Время выходного импульса, мс	Коэффициент заполнения импульса, %	Уровень напряжения на выходе ОУ, В	Форма выходного сигнала
20	0,840	4,2	0,23	
100	18	90	4,50	

Параметры пилообразного и импульсного сигналов напряжения: амплитуда — 5 В; частота — 50 Гц

Выходные сигналы 1 и 2 с разделителя в дальнейшем идут на силовые ключи инвертора напряжения (рис. 5).

На кафедре ЭППЭ НИУ МЭИ проводились эксперименты по наплавке валиков из стали 316L на установке электроннолучевой сварки, оборудованной механизмом подачи присадочной проволоки. Ускоряющее напряжение установки составляло 60 кВ, ток электронного пучка — 25 мА. Согласно такому режиму наплавки, в соответствии с полученными экспериментальными данными, номинальное напряжение источника питания управляющего электрода ЭЛП, необходимое для запаривания электронного пучка, не превышает 2000 В.

Исходя из схемы, изображенной на рис. 5, напряжение источника постоянного напряжения V6 прикладывается на резистивно-емкостную нагрузку R22 и C5 через делитель, состоящий из резисторов R20 и R21. Емкость C5 используется в качестве вакуумного промежутка электронно-лучевой установки и для начального исследования работы модели высоковольтного модулятора принимается равной 30 нФ.

Когда на затворы силовых МОП-транзисторов Q3 — Q6 не подаются импульсы напряжения с разделителя (см. рис. 4), выходная емкость C5 заряжается согласно постоянной времени $\tau = (R20 + R21 + R22)C5$. В момент открытия полевых транзисторов ток электрической цепи, создаваемый источником постоянного

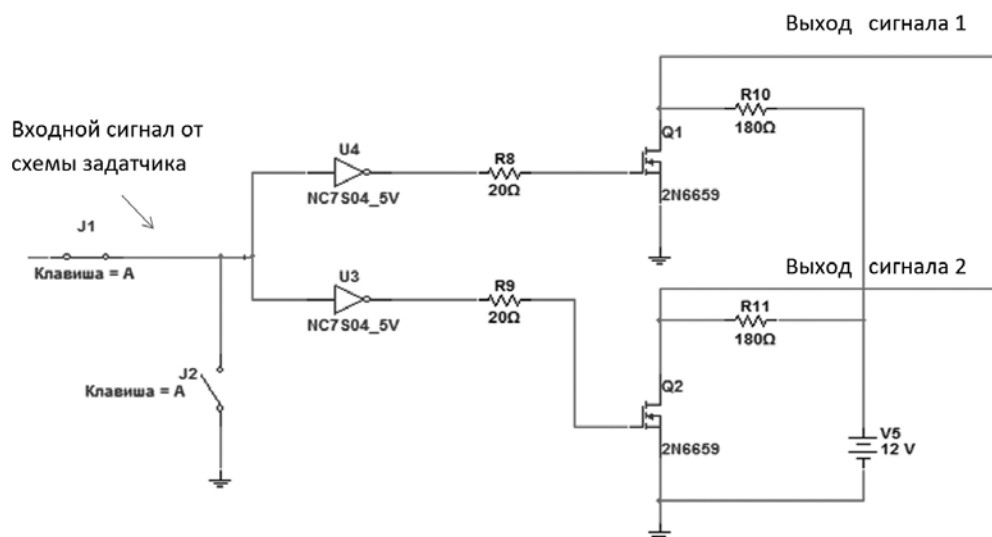


Рис. 4. Принципиальная схема разделителя импульсного сигнала

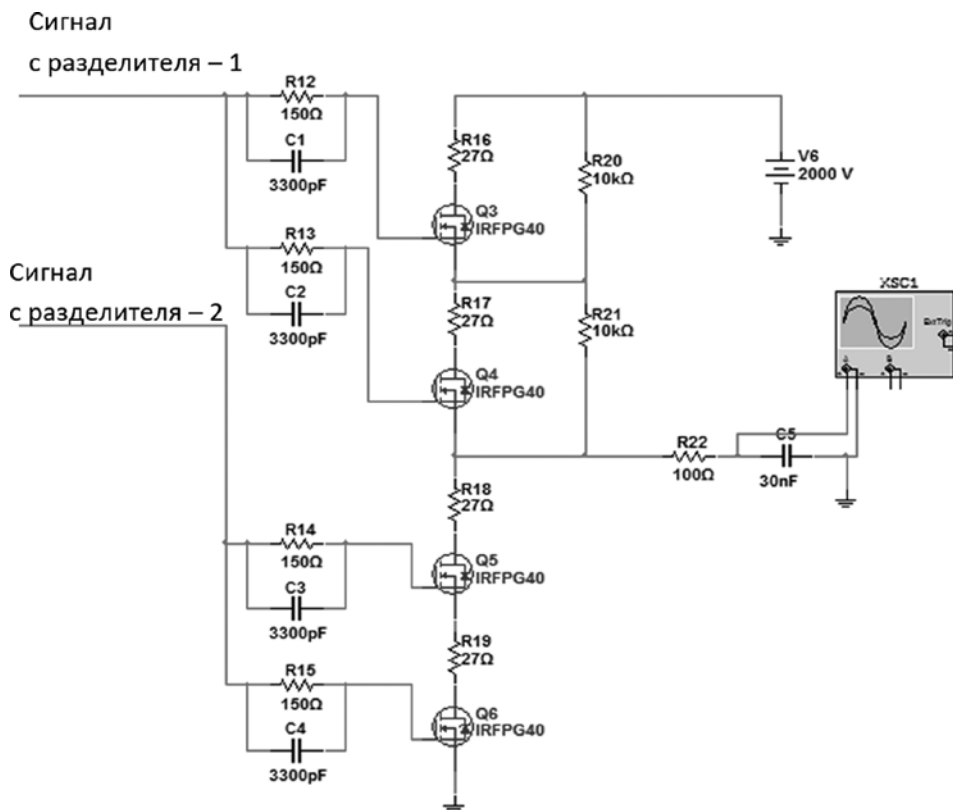


Рис. 5. Модель электрической схемы модулятора электрического напряжения

напряжения V_6 , стекает к «земле», вследствие чего емкость C_5 разряжается.

В качестве силовых ключей $Q_3 — Q_6$ в схеме использованы транзисторы IRFP40 типа MOSFET, полярности N . Они способны выдержать предельное напряжение сток–исток до 1000 В, при этом максимальный постоянный ток стока может достигать 4,3 А. Максимальная рассеиваемая мощность заявленных МОП-транзисторов — 150 Вт, для обеспечения надежной работы схемы модулятора в электрические

цепи затворов транзисторов добавлены дополнительные резистивные и емкостные элементы ($R_{12} — R_{15}$ и $C_1 — C_4$).

Результаты моделирования схемы модулятора напряжения в зависимости от длительности управляющих сигналов частотой 50 Гц, подающихся на затворы силовых транзисторов $Q_3 — Q_6$, представлены в табл. 2. Следует отметить, что показанная в модели элементная база позволяет вести анализ и оценку параметров импульсного напряжения частотой до 200 Гц.

Таблица 2

Форма и параметры импульсного напряжения модулятора

Длительность импульсов управляющих сигналов транзисторов Q3 — Q5, мс	Формы импульсов модулированного напряжения смещения электронной пушки и импульсов управляющих сигналов транзисторов Q3 — Q5
0,84	
18	

Форма импульсов модулированного напряжения смещения электронной пушки влияет на тепловые, металлургические, гидродинамические и газодинамические процессы формирования слоя оплавленной проволоки. В связи с этим разработанная модель модулятора электрического напряжения электронной пушки разрешает провести настройку параметров цепи обратной связи источника напряжения смещения, а также полезна в подборе элементной базы для дальнейших решений задач проектирования и разработки комплекса систем электропитания и управления электронным пучком лучевой пушки в установке аддитивного формообразования.

Выводы

На основании теоретических и экспериментальных данных выявлены диапазоны изменения частоты, амплитуды импульсов напряжения смещения электрон-

но-лучевой пушки в технологии послышной наплавки стальной проволоки. Подобраны требования к параметрам импульсной модуляции напряжения источника питания управляющего электрода ЭЛУ.

Разработана и представлена модель электрической схемы модулятора, позволяющая оценить параметры импульсов модулированного напряжения при различных диапазонах коэффициента заполнения импульсов системы управления, провести подбор элементной базы модулятора, осуществить настройку параметров цепи обратной связи источника напряжения смещения.

Продемонстрированная в модели элементная база позволяет анализировать и оценивать параметры импульсного напряжения смещения электронно-лучевой пушки с частотой импульсов от 50 до 200 Гц. Проверка работы модели модулятора при больших частотах требует использования другой элементной базы.

Литература

1. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015.
2. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии — доминанта национальной технологической инициативы // Интеллект и технологии. 2015. № 2. (11). С. 52—55.

References

1. Zlenko M.A., Nagaytsev M.V., Dovbysh V.M. Additivnye Tekhnologii v Mashinostroenii. M.: GNTS RF FGUP «NAMI», 2015. (in Russian).
2. Kablov E.N. Additivnye Tekhnologii — Dominanta Natsional'noy Tekhnologicheskoy Initsiativy. Intellekt i Tekhnologii. 2015;2. (11):52—55. (in Russian).

3. **Назаренко О.К.** Схемотехника управления током сварочного пучка электронов. Киев: Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2013.

4. **Ольшанская Т.В., Саломатова Е.С.** Обзор современных способов управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке // Вестник ПНИПУ. Серия «Машиностроение и материаловедение». 2016. Т. 18. № 4. С. 169—187.

5. **Щербаков А.В.** Современные принципы построения источников питания электронно-лучевых сварочных установок // Электротехника. 2012. № 4. С. 28—34.

6. **Назаренко О.К., Истомин Е.И., Локшин В.Е.** Электронно-лучевая сварка. Харьков: Машиностроение, 1985.

7. **Чвертко А.И., Назаренко О.К., Святский А.М., Некрасов А.И.** Оборудование для электронно-лучевой сварки. Киев: Наукова думка, 1973.

8. **Машиностроение.** Т. IV-6. Оборудование для сварки. М.: Машиностроение, 1999.

9. **Щербаков А.В.** Энергетические и технологические процессы импульсного регулирования тока электронного пучка в установках прецизионной сварки // Электричество. 2012. № 3. С. 56—62.

10. **Kautz D.D., Olson D.L., Burgardt P., Edwards G.R.** A Characterization of Pulsed Electron Beam Welding Parameters // Welding J. Research Suppl. 1991. V. 70. No. 4. Pp. 100—150.

3. **Nazarenko O.K.** Skhemotekhnika Upravleniya Tokom Svarochnogo Puchka Elektronov. Kiev: Institut Elektrosvarki im. E.O. Patona NAN Ukrainy, 2013. (in Russian).

4. **Ol'shanskaya T.V., Salomatova E.S.** Obzor Sovremennykh Sposobov Upravleniya Elektronnykh Luchom pri Elektronno-luchevoy Svarke. Vestnik PNIPU. Seriya «Mashinostroenie i Materialovedenie». 2016;18;4: 169—187. (in Russian).

5. **Shcherbakov A.V.** Sovremennye Printsipy Postroeniya Istochnikov Pitaniya Elektronno-luchevykh Svarochnykh Ustanovok. Elektrotehnika. 2012;4:28—34. (in Russian).

6. **Nazarenko O.K., Istomin E.I., Lokshin V.E.** Elektronno-luchevaya Svarka. Khar'kov: Mashinostroenie, 1985. (in Russian).

7. **Chvertko A.I., Nazarenko O.K., Svyatskiy A.M., Nekrasov A.I.** Oborudovanie dlya Elektronno-luchevoy Svarki. Kiev: Naukova Dumka, 1973. (in Russian).

8. **Mashinostroenie.** T. IV-6. Oborudovanie dlya Svarki. M.: Mashinostroenie, 1999. (in Russian).

9. **Shcherbakov A.V.** Energeticheskie i Tekhnologicheskie Protsessy Impul'snogo Regulirovaniya Toka Elektronnogo Puchka v Ustanovkakh Pretsizionnoy Svarki. Elektrichestvo. 2012;3:56—62. (in Russian).

10. **Kautz D.D., Olson D.L., Burgardt P., Edwards G.R.** A Characterization of Pulsed Electron Beam Welding Parameters. Welding J. Research Suppl. 1991;70;4:100—150.

Сведения об авторах:

Вахмянин Никита Михайлович — аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: vahmyaninm@mail.ru

Щербаков Алексей Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: ShcherbakovAV@mpei.ru

Гапонова Дарья Александровна — инженер кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: dgaponva@mail.ru

Information about authors:

Vakhmyanin Nikita M. — Ph.D.-student of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: vahmyaninm@mail.ru

Shcherbakov Aleksey V. — Dr.Sci. (Techn.), Professor Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: ShcherbakovAV@mpei.ru

Gaponova Daria A. — Engineer of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: dgaponva@mail.ru

Работа выполнена при поддержке: Работа выполнена в ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-79-20015)

The work is executed at support: The work was carried out in FSBEI HL NRU «MPEI» with the support of the Foundation Russian Science Foundation (grants No. 17-79-20015)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 18.12.2017

The article received to the editor: 18.12.2017