

Вакуумная, плазменная и квантовая электроника

УДК 533.9.07:537.533

Прецизионное управление параметрами импульсных газоразрядных источников электронов

П.И. Кравец., канд.техн.наук, С.Б. Тугай

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", факультет электроники, кафедра электронных приборов и устройств, 03055, Киев, Украина, пр. Победы, 37, корпус 12.

В статье приводятся результаты компьютерного моделирования двухканальной системы управления триодной электронно-лучевой пушкой высоковольтного тлеющего разряда технологического назначения в импульсном режиме работы.

Для построения адекватной модели были использованы экспериментально полученные параметры реальных устройств, входящих в технологическое оборудование. Полученные в результате параметры системы управления были использованы для создания экспериментального макета и проведены исследования его работы.

Предложенная система управления параметрами электронного пучка технологической триодной газоразрядной пушки высоковольтного тлеющего разряда обеспечила проведение технологического процесса нанесения покрытия из Al_2O_3 в импульсном режиме с высокими показателями качества и может быть использована для проведения других технологических операций с импульсными газоразрядными источниками электронов. Библ. 7, рис. 7.

Ключевые слова: электронно-лучевые технологии, высоковольтный тлеющий разряд, импульсные газоразрядные источники электронов, триодные газоразрядные пушки с холодным катодом, импульсный режим работы, управление электронным пучком.

Введение

Газоразрядные источники электронов (ГРИЭ) с холодным катодом являются перспективным технологическим оборудованием в различных производственных процессах электронно-лучевой технологии обработки материалов, в частности сварки, испарения, вакуумного переплава материалов и других процессов [2,3]. Такие ГРИЭ имеют большой срок службы холодного катода, возможность работы в услови-

ях низкого и среднего вакуума в различных газовых средах, относительную простоту конструкции и высокую надежность [1,4,5].

Разработка ГРИЭ с импульсными режимами работы, генерирующих импульсные электронные пучки с заданными энергетическими и временными параметрами, расширяет возможности их применения в электронно-лучевой технологии, а также позволяет повысить качество выходной продукции. Выбором параметров импульсного источника электронов возможно осуществлять прецизионное управление скоростью введения энергии в зону обработки и получать, таким образом, различные эффекты термического влияния от плавки до испарения материала, не перегревая периферийные области обрабатываемой электронным пучком поверхности, уменьшая структурные дефекты и сохраняя стехиометрию состава испаряемых соединений [2,3]. В зависимости от требований технологической операции длительность импульсов тока электронного пучка может составлять от единиц до сотен миллисекунд.

Известно [1,4,5], что в промышленных ГРИЭ, называемых также газоразрядными электронными пушками (ГРЭП), работающих в непрерывном режиме, управление током разряда источника электронов во всем его рабочем диапазоне осуществляется газодинамическим способом. Такое управление заключается в изменении уровня вакуума газовых сред в разрядном пространстве источника электронов путем напуска газа в это пространство при непрерывной его откачке. При таком способе управления, из-за нелинейности, инерционности и нестационарности характеристик натекателя с электромагнитным приводом и системы откачки газа из технологической камеры, минимальное время регулирования составляет не менее сотен миллисекунд, а статическая и динамическая погрешности управления - единицы процентов. Поэтому такой способ управления не позволяет

осуществлять формирование импульсных электронных пучков с временными характеристиками, удовлетворяющими требованиям технологических процессов.

Импульсный режим работы реализуется в триодных ГРЭП, где для управления мощностью основного разряда пушки применяют дополнительный низковольтный разряд, который зажигают в области анодной плазмы основного разряда пушки. Для этого на дополнительный электрод, помещенный в разрядном промежутке в области анодной плазмы основного разряда, подают потенциал в десятки – сотни Вольт и зажигают вспомогательный низковольтный несамоостоятельный тлеющий разряд [1,4]. Для зажигания вспомогательного управляющего разряда необходим небольшой начальный ток основного разряда, не превышающий десятков миллиампер. Горения основного разряда малой мощности в паузе между мощными импульсами тока необходимо поддерживать давлением газа в источнике электронов на заданном уровне, что обеспечивается с помощью системы автоматического управления давлением. Основной разряд столь низкой мощности не оказывает значительного термического влияния на обрабатываемую поверхность и не имеет технологического значения. Поэтому такой режим работы триодного источника электронов можно рассматривать как чисто импульсный.

В триодных газоразрядных пушках обеспечить формирование импульсов тока основного разряда в заданном временном интервале и с требуемой точностью поддержания мощности импульса, возможно за счет построения двухканальной системы управления, обеспечивающей высокую точность поддержания требуемого уровня давления газа (начального тока разря-

да) в разрядной камере и стабилизацию тока пушки в импульсе при неизменном ускоряющем напряжении.

Высокая точность и качество работы системы управления подачей газа может быть обеспечено за счет реализации астатической системы управления и ограничения диапазона работы натекателя на его рабочей характеристике, а высокая точность системы стабилизации амплитуды тока пучка в импульсе – за счет реализации импульсной астатической системы управления.

В работе [4] ГРЭП с управлением газодинамическим способом представлена моделью, описывающей динамику процесса работы натекателя газа с электромагнитным приводом, процесс изменения давления газа в камере пушки и процессы изменения тока пушки в зависимости от давления газа в камере пушки. Структурная схема модели показана на рис.1

где $W_1(s) = \frac{k_1}{T_1s + 1}$ – передаточная функция

электромагнитной катушки привода натекателя,

$W_2(s) = \frac{k_1}{T_2s^2 + T_3s + 1}$ – передаточная функция

механической части привода натекателя, $F_1(u)$

– функция, описывающая люфт привода натекателя, $W_a(s) = e^{-\tau s}$ – передаточная функция,

характеризующая процесс запаздывания изменения давления газа в камере пушки, $F_2(u)$ –

нелинейная статическая характеристика зависимости тока пушки от давления газа в камере пушки. Примерный вид зависимостей $F_1(u)$ и $F_2(u)$ показаны на рис.2. и рис.3 соответственно.

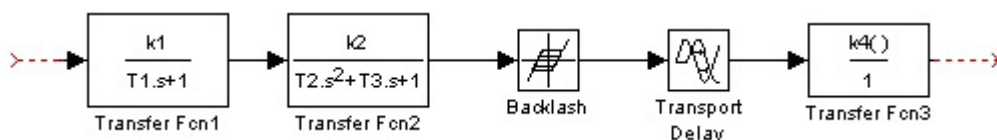


Рис. 1. Схема управления ГРЭП газодинамическим способом

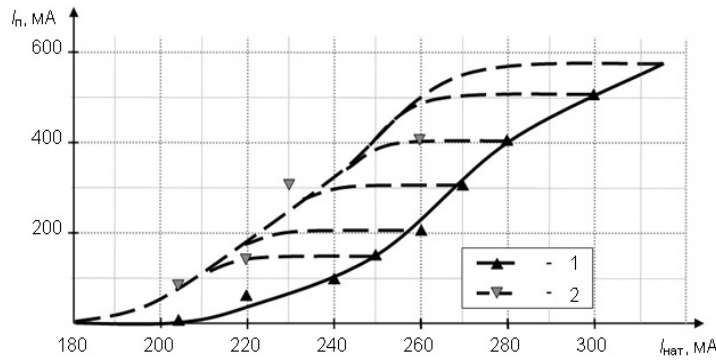


Рис. 2. Зависимость тока пушки от тока электромагнитного привода натекателя

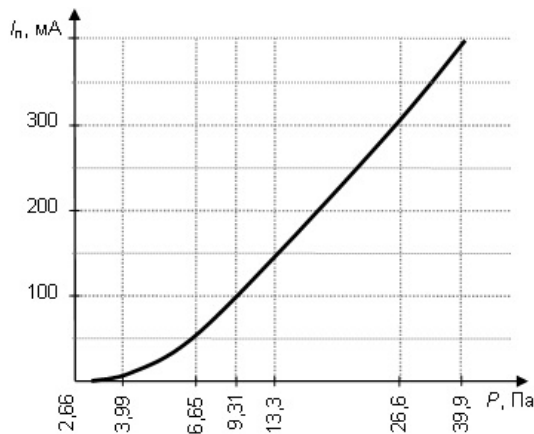


Рис. 3. Зависимость тока пучка электронов ВТР от давления газа в разрядном промежутке

В общем виде математическая модель ГРЭП при управлении газодинамическим способом является существенно нелинейной и может быть представлена в следующем виде

$$W_{ГРЭПгд}(s) = F_1(s)F_2(s)W_1(s)W_2(s)W_3(s) \quad (1)$$

Модель ГРЭП при управлении током разряда за счет изменения потенциала управляющего электрода пушки может быть представлена нелинейным динамическим звеном первого порядка [6, 7].

$$W_{ГРЭПвн}(s) = \frac{F_5(u)}{T_5s + 1} \quad (2)$$

Примерный вид статической характеристика звена $F_3(u)$ показан на рис.4, где импульсный режим: 1 – $f = 125$ Гц; 2 – $f = 250$ Гц; 3 – $f = 500$ Гц; 4 – непрерывный режим; $U_{осн} = 20$ кВ, $\tau = 1$ мс., материал катода – алюминий.

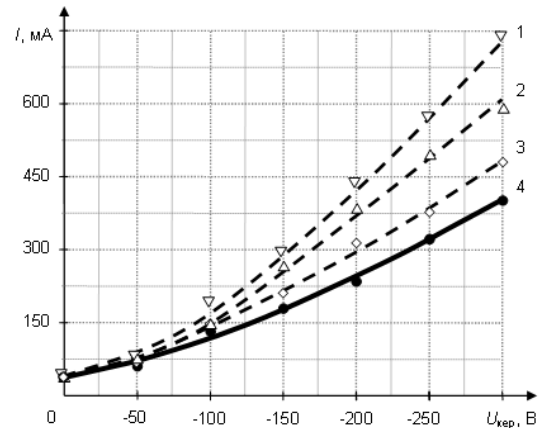


Рис. 4. Зависимость тока пушки от потенциала на управляющем электроде и частоты импульсов при работе в воздушной среде низкого давления

Общая структурная схема модели триодной ГРЭП показана на рисунке 5.

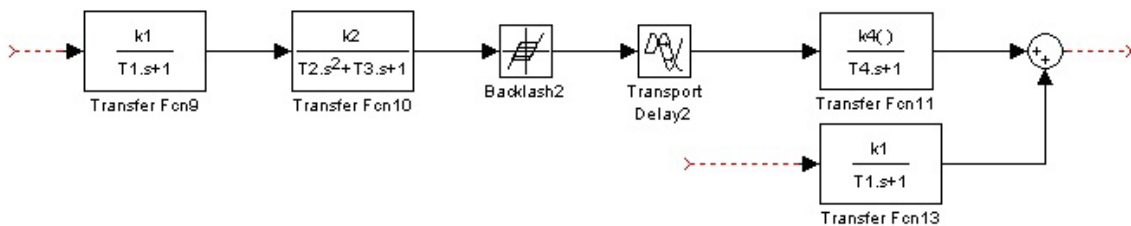


Рис. 5. Схема двуканальной системы управления триодной ГРЭП

Исходя из такой модели, можно реализовать систему импульсного управления током разряда

и мощностью пучка ГРЭП, структурная схема которой показана на рис.6.

В этой системе реализованы два замкнутых контура регулирования на основе ПИД-регуляторов, обеспечивающих регулирование и стабилизацию начального тока разряда пушки (контур на основе регулятора *Reg.1*, где

Subsystem – газодинамический натекатель, структурная схема которого показана на рис.1), и заданного значения амплитуды импульса тока (контур на основе регулятора *Reg.2*).

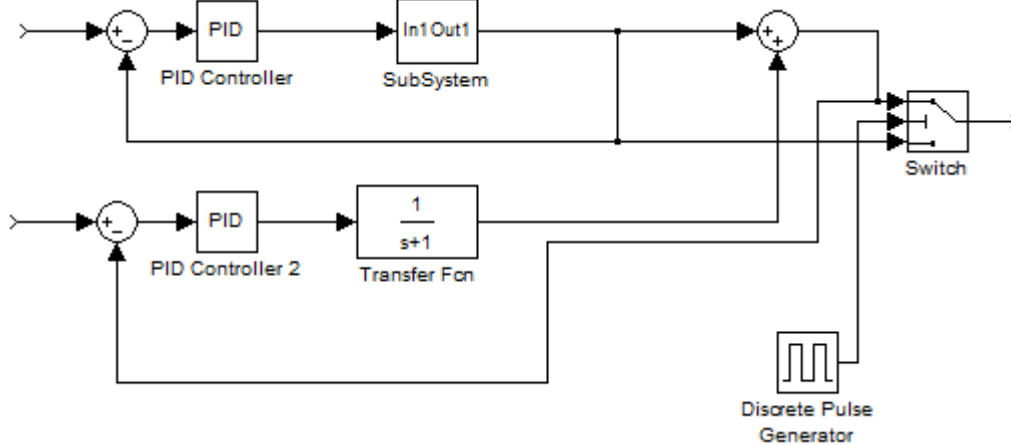


Рис. 6. Схема импульсной двуканальной системы управления триодной ГРЭП

Основными задачами системы управления является обеспечение заданной точности стабилизации тока в статическом режиме и аperiodические переходные процессы с минимальным временем регулирования при изменении задающих и возмущающих воздействий.

Как видно из рисунка 6 полученная система управления относится к типу нелинейных многомерных систем связанного регулирования с двумя входами и двумя выходами. Однако, учитывая, что процесс регулирования амплитуды импульса тока больше чем на порядок превосходит по быстродействию процесс регулирования давления газа натекателем, то процессы регулирования в контурах системы можно рассматривать как независимые.

Известно [6, 7], что для реализации замкнутой астатической системы управления объектом, представляемым моделью (1), необходим регулятор с пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования (*Reg.1*), для объекта типа (2) – регулятор с пропорционально-интегральным законом регулирования (*Reg.2*).

Для наладки замкнутых контуров системы управления (рис.6) необходимо определить параметры (коэффициенты усиления и временные параметры) моделей (1) и (2) и воспользоваться одной из методик настройки перечисленных регуляторов, рассмотренных, например, в [6, 7].

Учитывая, что объекты управления (1) и (2) является нелинейными, то с целью обеспечения требуемого запаса устойчивости в системах

управления, определять оптимальные настройки параметров регуляторов необходимо при максимальных значениях коэффициентов усиления звеньев моделей объектов (1) и (2). Более наглядными процессы регулирования в системах при различных значениях настраиваемых параметров регуляторов и параметров объектов управления можно получить путем моделирования работы систем управления.

В статическом режиме (режим стабилизации) погрешность работы системы определяется только погрешностью датчиков тока и напряжения.

Экспериментальное исследование работы системы управления производилось при нанесении покрытия из керамики Al_2O_3 в реактивной газовой среде с помощью газоразрядного электронно-лучевого испарителя триодного типа мощностью до 10 кВт. Исследование проводилось на вакуумной установке УРМ3.729.047. Испаритель был установлен на фланце вакуумной камеры установки и сообщался с камерой через лучевод. Внутри вакуумной камеры был установлен медный водоохлаждаемый тигель, в котором размещался испаряемый материал Al_2O_3 . Подложки для нанесения покрытия размещались сверху над тиглем.

Управление током электронного пучка в триодном газоразрядном испарителе осуществлялось с помощью вспомогательного низковольтного несамостоятельного тлеющего разряда, зажигаемого в области анодной плазмы основного разряда при подаче на управляющий электрод положительного или отрицательного

потенциала. Генерирование мощных импульсов происходило в период одновременного горения основного и вспомогательного разрядов, причем ток в импульсе регулируется изменением потенциала на управляющем электроде. Для зажигания вспомогательного разряда необходим небольшой ток (единицы-десятки мА) основного разряда, который поддерживался на заданном уровне регулированием давления в разрядном промежутке электронно-лучевого испарителя.

В процессе работы разработанная система управления ГРЭП обеспечивала стабилизацию начального тока пучка на заданном уровне ре-

гулированием давления в пушке и стабилизацию тока в импульсе изменением потенциала на управляющем электроде.

Разработанная система управления обеспечивала генерирование импульсов тока газоразрядного электронно-лучевого испарителя мощностью 10 кВт при ускоряющем напряжении 15кВ в диапазоне от 50 до 750мА в диапазоне частот до 1 кГц и минимальной длительностью 0,5 мс.

Примерный вид процессов импульсного управления током показан на рис.7.

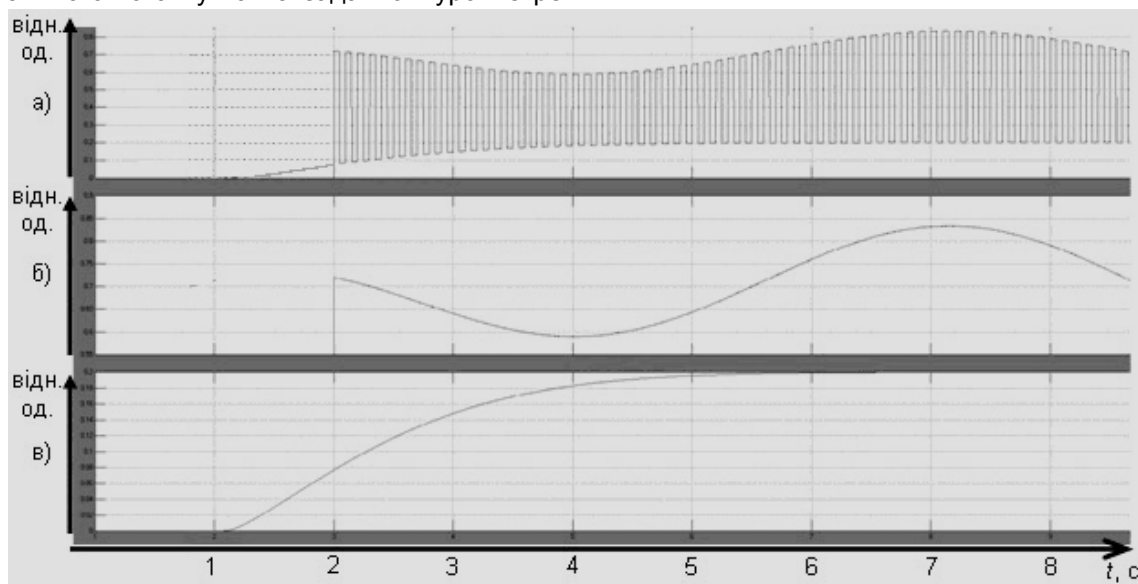


Рис. 7. Характеристики процесса управления параметрами трёхэлектродной ГРЕП полученные в результате компьютерного моделирования: а) регулируемый ток пушки ВТР; б) задаваемый ток пушки ВТР; в) "начальный" ток пушки ВТР в паузе между импульсами

Экспериментальное нанесение покрытия Al_2O_3 в импульсном режиме работы испарителя производилось при следующих режимах: $U_{уск} = 15$ кВ, $I_{и} = 250$ мА, $\tau_{им} = 2$ мс; $f = 200$ Гц. Давление газа в технологической камере составляло $2 \cdot 10^{-2}$ Па.

При нанесении покрытия на неподвижную подложку скорость осаждения составила около 1 мкм/с.

Анализ поверхности и структуры показал отсутствие капельной фракции на поверхности и соответствие стехиометрического состава покрытия испаряемому материалу.

Выводы

Проведенные теоретические и практические исследования показали, что с помощью предложенной модели управления триодными пушками ВТР с холодным катодом возможна реализация импульсного режима работы с параметрами, отвечающими требованиям электронно-лучевой технологии. Экспериментальный макет системы управления позволил провести технологический процесс напыления покрытия и получить выходной образец заданного качества.

Литература

1. *Denbnovetsky S.V., Melnyk V.G., Melnyk I.V.* High voltage glow discharge electron sources and possibilities of its application in industry for realising of different technological operations. // IEEE Transactions on plasma science. – Vol. 31, #5, October, 2003. – P. 987-993.
2. *Ладохин С.В., Левицкий Н.И., Чернявский В.Б., Лапшук Т.В., Шмигидин В.Г., Кравчук Л.А., Гладков А.С.* Электронно-лучевая плавка в литейном производстве. – К.: „Сталь”, 2007. – 605 с.
3. *Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А.* Основы электронно-лучевой обработки материалов. М. Машиностроение, 1978, 239 с.
4. *Denbnovetsky S.V, Melnik V.I., Melnik I.V., Tugay B.A.* Investigation of forming of electron beam in glow discharge electron guns with additional electrode. - XVIII-th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, August 17-21, 1998, Eindhoven, The Netherlands, Proceedings, vol.2. - P. 637-640.
5. *Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П.* Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Атомиздат, 1989. – 256 с.
6. *А. С. Ключев, А. Т. Лебедев, С. А. Ключев,* Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие. Товарное; Под ред. А. С. Ключева. —2-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергоатомиздат, 1989.- 368 с. ил.
7. *Денисенко В.В.* Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием, М.: Горячая линия-Телеком, 2009. — 608 с. ил.

УДК 533.9.07:537.533

Прецизійне керування параметрами імпульсних газорозрядних джерел електронів

П.І. Кравець, канд.техн.наук, **С.Б. Тугай**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв, 03056, Київ, Україна, пр. Перемоги, 37, корпус 12.

В статті приводяться результати комп'ютерного моделювання двоканальної системи керування тріодною електронно-променевою гарматою високовольтного тліючого розряду технологічного призначення в імпульсному режимі роботи.

Для побудови адекватної моделі були експериментально отримані параметри реальних пристроїв, що входять в технологічне устаткування. Отримані в результаті параметри системи керування були використанні для створення експериментального макету та проведені дослідження його роботи.

Запропонована система керування параметрами електронного пучка технологічної тріодної газорозрядної гармати високовольтного тліючого розряду забезпечила проведення технологічного процесу нанесення покриття з Al_2O_3 в імпульсному режимі з високими показниками якості і може бути використана для проведення інших технологічних операцій з імпульсними газорозрядними джерелами електронів. Бібл. 7, рис. 7.

Ключові слова: електронно-променевої технології, високовольтний тліючий розряд, імпульсні газорозрядні джерела електронів, тріодні газорозрядні гармати з холодним катодом, імпульсний режим роботи, керування електронним пучком.

UDC 533.9.07:537.533

Investigation of electron-optics characteristics of triode gas discharge electron gun with cold cathode

P.I. Kravez, Ph.D, **S.B. Tugai**

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,
pr. Peremogy, 37, Kiyv-56, 03056, Ukraina.

Results of computer simulating of two channel control system of a technological triode high-voltage glow-discharge electron-beam gun in the pulse-mode are considered.

With a purpose of creation adequate model there were the experimentally got parameters of the real devices which are included in technological equipment. The parameters of control system were got as a result and were used for creation of experimental prototype. Experimental investigation of its operation was also done.

Offered control system of electronic beam parameters of technological triode gas discharge gun of high-voltage glow-discharge allowed to provide the technological process of overcoating from Al_2O_3 in the pulse-mode with high-performance quality and can be used for the other technological operations with impulsive gas discharge electronogens. References 7, figures 7

Keywords: electron-beam technologies, high voltage glow discharge, pulse gas discharge electron sources, triode gas discharge electron guns with cold cathode, pulse operation mode, electron beam control.

References

1. *Denbnovetsky S.V., Melnyk V.G., Melnyk I.V.* (2003), "High voltage glow discharge electron sources and possibilities of its application in industry for realising of different technological operations". IEEE Transactions on plasma science. Vol. 31, No.5, October, Pp. 987-993.
2. *Ladohyn S.V., Levytsky N.I., Chernyavskyy V.B., Lapshuk T.V., Shmyhydean V.G., Kravchuk L.A., Gladkov A.S.* (2007), "Electron-luchevaya plavka v lytejnomye proizvodstve". K. "Stal", p. 605. (RUS)
3. *Rykalin N.N., Zuev I.V., Uglov A.A.* (1978), "Osnovy electron lychevoy obrabotki materialov". M. Mashinostroenie, p. 239. (RUS)
4. *Denbnovetsky S.V., Melnik V.I., Melnik I.V., Tugay B.A.* (1998), "Investigation of forming of electron beam in glow discharge electron guns with additional electrode". XVIII-th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, August 17-21, Eindhoven, The Netherlands, Proceedings, Vol.2. Pp. 637-640.
5. *Zavyalov M.A., Kreindel Y.E., Novikov A.A., Shanturin L.P.* (1989), "Plasmennye procesy v technologicheskikh electronnykh pushkakh". M. Atomizdat, P. 256. (RUS)
6. *A.S. Kluev, A.T. Lebedev, S.A. Kluev.* (1989), "Naladka sredstv avtomatizatsii i avtomaticheskikh sistem regulirovaniya: Spravochnoe posobie". Tovarnoe; Pod red. A.S. Klueva. 2-e izd., pererab. I dop. M.: Energoatomizdat, P. 368. (RUS)
7. *Denisenko V.V.* (2009), "Komputernoe upravlenie technologicheskimi procesami, eksperimentom, oborudovaniem". M. Goryachaya liniya – Telekom, P. 608. (RUS)

Поступила в редакцию 11 июня 2013 г.