

DOI 10.15589/jnn20170408  
 УДК 537.523  
 Б73

**INTELLIGENT CONTROL SYSTEM FOR THE HIGH-VOLTAGE PULSE POWER SOURCE OF THE COMPLEX FOR ELECTROFILTRATION AND DESTRUCTION OF GAS EMISSIONS**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАЦИИ И ДЕСТРУКЦИИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ**

**Leonid Z. Boguslavskyi,**  
 dpes@iippt.ua  
 ORCID: 0000-0001-6738-1889

**Larisa Ye. Ovchinnikova,**  
 lora947@gmail.com  
 ORCID: 0000-0003-0421-9731

**Serhiy S. Kozыrev,**  
 skozyrev@gmail.com  
 ORCID: 0000-0003-1725-1415

**Л. З. Богуславский,**  
 канд. техн. наук, доц.<sup>1,2</sup>

**Л. Е. Овчинникова,**  
 канд. техн. наук, доц.<sup>1,2</sup>

**С. С. Козырев,**  
 канд. техн. наук, доц.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, Mykolaiv*

<sup>2</sup>*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

<sup>1</sup>*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев*

<sup>2</sup>*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

**Abstract.** A study has been conducted with gas emissions of different impedance as an object of processing and a high-voltage pulse generator as an object of control. It allowed defining the informational coordinates and control action channels. The experimental study employing a simulated model of high-voltage equipment of the electrofiltration system became the basis for development of the set of control laws and a knowledge base for the intelligent control system. Thus, there was developed an intelligent control system for the pulse generator of the electrofiltration system. The algorithm provides adjustments of pulse parameters according to the current composition of gas burst. This allows generating high-voltage pulses which provide an efficient decomposition of major components of gas emissions.

**Keywords:** intelligent control; algorithm; high-voltage pulse power source; electrofiltration; destruction; gas emissions.

**Анотація.** Розроблено інтелектуальну систему керування імпульсним джерелом живлення системи електрофільтрації, який сприяє коригуванню параметрів імпульсів відповідно до поточного складу екологічно небезпечних промислових газових викидів. Визначено інформаційні координати й канали керувальних впливів. Доведено, що алгоритм роботи інтелектуальної системи керування дає змогу генерувати високовольтні імпульси з параметрами, які забезпечують ефективну деструкцію всіх вагомих складових газових викидів у процесі обробки.

**Ключові слова:** інтелектуальна система керування; алгоритм; імпульсне високовольтне джерело живлення; електрофільтрація; деструкція; газові викиди.

**Аннотация.** Разработана интеллектуальная система управления импульсным источником питания системы электрофильтрации, обеспечивающая корректировку параметров импульсов в соответствии с текущим составом экологически опасных промышленных газовых выбросов. Определены информационные координаты и каналы управляющих воздействий. Доказано, что алгоритм работы интеллектуальной системы управления дает возможность генерировать высоковольтные импульсы с параметрами, позволяющими вести эффективную деструкцию всех весомых составляющих в процессе обработки.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система управления; алгоритм; импульсный высоковольтный источник питания; электрофильтрация; деструкция; газовые выбросы.

**REFERENCES**

[1] Boguslavskiy L. Z., Miroshnichenko L. N., Kazaryan Yu. G., Yaroshinskiy N. S Vliyanie rezhimov raboty vysokovoltного istochnika pitaniya na formirovanie strimernogo koronnogo razryada i effektivnost sistem

- gazoочистки [Effect of high voltage power supply modes on the formation of a streamer corona discharge and efficiency of gas purification systems]. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vyp. Sylova elektronika ta enerhoeffektivnist.* [Technical electrodynamic. Power Electronics and Energy Efficiency]. 2011, pp. 44–49.
- [2] Boguslavskiy L. Z., Mirosnichenko L. N., Diordiychuk V. V., Vinnichenko D. V., Yaroshinskiy N. S. Sozdanie maketnykh obraztsov vysokovoltного oborudovaniya kompleksnykh sistem elektrofiltratsii ekologicheskii opasnykh promyshlennykh vybrosov [Creating prototypes of high-voltage equipment of integrated systems of electrofiltration of environmentally hazardous industrial emissions]. *Vestnik «KhPI». Tem. vyp. «Tekhnika i elektrofizika vysokikh napryazheniy»* — Bulletin of KhPI. «Technique and electrophysics of high voltages», 2012, no 52 (958), pp. 31–39.
- [3] Boguslavskiy L. Z., Mirosnichenko L. N. Elektrofiltratsiya raznoimpedansnykh gazovykh vybrosov v kompleksnoy sisteme pylegazoочистки ekologicheskii opasnykh promyshlennykh obektov [Electrofiltration of gas emissions of different impedance in complex system of gas and dust purification of environmentally hazardous industrial facilities]. *Vestnik «KhPI». Tem. vyp. «Tekhnika i elektrofizika vysokikh napryazheniy»* — Bulletin of KhPI. «Technique and electrophysics of high voltages», 2014, no 21, pp. 12–16.
- [4] Gazoanaliticheskie pribory, ZAO «Ukranalit» [Gas analyzers, JSC “Ukranalit”]. Available at: [http://www.ukranalyt.com.ua/index4\\_0.htm](http://www.ukranalyt.com.ua/index4_0.htm).
- [5] Bohuslavskiy L. Z., Myroshnychenko L. M., Kazarian Yu. H., Khrysto O. I. *Henerator vysokovoltnykh impulsiv z nanosekundnym frontom dlia otrymannia strymernoho koronnoho rozriadu* [High-voltage pulse generator with a nanosecond front producing a streamer corona discharge]. Patent UA, no. u 2009 12959, 2009.
- [6] Bohuslavskiy L. Z., Myroshnychenko L. M., Diordiichuk V. V. *Sposib destrukttsii riznoimpedansnykh hazovykh vykydiv nebezpechnykh promyslovykh ob`yektiv* [Method for the destruction of gas emissions of different impedance from hazardous industrial objects]. Patent UA, no. u 2013 11731, 2013.
- [7] Bohuslavskiy L. Z., Myroshnychenko L. M., Ovchynnikova L. Ye. *Systema impulsnoho elektrozhylennia elektrofiltriv dlia ochyshchennia riznoimpedansnykh hazovykh vykydiv* [Pulse power supply system for the electrofilters cleaning gas emissions of different impedance]. Patent UA, no. u 2014 07889, 2014.
- [8] Rodionov A. I., Klushin V. N, Sister V. G. *Tekhnologicheskie protsessy ekologicheskoy bezopasnosti* [Technological processes of ecological safety]. Kaluga, Bochkareva N. Publ., 2000. 800 p.
- [9] Chekalov L. V. *Osnovy razrabotki i konstruirovaniya elektrofiltrov novogo pokoleniya* [Fundamentals of design and development of a new generation of electrostatic precipitators]. *InformTsement Publ.*, 2006, no 5, pp. 67–69.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Действующие на данный момент в Украине газоочистные системы тепловых электростанций и других промышленных объектов не обеспечивают соблюдения европейских нормативных требований по уровню выбросов твердых частиц. Отсутствует также очистка от таких вредных газовых выбросов, как  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}_x$ , превышающих нормы ЕС во много раз. Энергопотребление действующих систем электрофильтрации в 5–6 раз превосходит аналогичные показатели развитых стран [8, 9].

Для выполнения данных требований к газовым выбросам и повышения эффективности существующих электрофильтров без их капитальной реконструкции предложен способ, использующий дополнительные импульсные высоковольтные высокочастотные источники питания, формирующие импульсы напряжения специальной формы [6], которые гарантируют как осаждение пыли, в результате дозарядки, так и деструкцию экологически опасных составляющих газовых выбросов.

С целью дозарядки и осаждения определенного вида пыли, а также для деструкции каждого вида опасных составляющих газовых выбросов разрабаты-

вались отдельные дополнительные импульсные высоковольтные высокочастотные источники питания без возможности текущего управления параметрами импульсов в процессе электрофильтрации. Это снижало эффективность их использования в комплексных системах электрофильтрации при текущем изменении качественного и количественного состава выбросов и приводило к значительному увеличению затрат на очистку промышленных газовых выбросов сложного состава. Устранение указанных недостатков существующих систем электрофильтрации и деструкции экологически опасных газовых выбросов требует дополнительного изучения.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Проведенные ранее исследования показали наличие в промышленных газовых выбросах различных опасных составляющих и пылевых частиц с разным сопротивлением, а также текущее изменение их соотношения в процессе очистки [3], что обуславливает необходимость корректировки параметров импульсов дополнительных импульсных высоковольтных высокочастотных источников питания в соответствии

с текущим составом и весовыми долями промышленных газовых выбросов. Определены необходимые параметры импульсов (амплитуда, длительность, крутизна фронта, частота следования) для дозарядки и осаждения определенного вида пыли, а также для деструкции каждого вида опасных составляющих газовых выбросов [1].

Применяемые в системах электрофильтрации дополнительные импульсные высокочастотные источники питания не имеют возможности текущего управления параметрами импульсов в процессе электрофильтрации, что существенно снижает их эффективность [5].

Для повышения успешности использования дополнительных импульсных высокочастотных источников питания в системах комплексной электрофильтрации, более полного осаждения и деструкции опасных составляющих промышленных газовых выбросов необходима разработка интеллектуальных систем управления импульсными высоковольтными высокочастотными источниками питания комплексных систем электрофильтрации, позволяющих управлять параметрами генерируемых импульсов в соответствии с текущим состоянием обрабатываемой среды.

**ЦЕЛЮЮ РАБОТЫ** является исследование экологически опасных промышленных газовых выбросов как объекта обработки, а также импульсных высоковольтных высокочастотных источников питания как объекта управления для определения координат вектора состояния, выбора информационных входных координат и каналов управляющих воздействий, что способствует созданию интеллектуальной системы управления, позволяющей варьировать параметры импульсов напряжения в процессе осаждения разноимпедансных пылевых частиц и деструкции экологически опасных составляющих в зависимости от текущего состава и весовых долей промышленных газовых выбросов

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Предварительный анализ экологически опасных промышленных выбросов показал, что в их состав входят разноимпедансные пылевые частицы; соединения углерода  $CO_x$ , серы  $SO_x$  и азота  $NO_x$ ; высокомолекулярные канцерогенные соединения. Для осаждения разноимпедансных пылевых частиц и деструкции экологически опасных составляющих необходимы высоковольтные импульсы напряжения специальной формы с различными параметрами [3].

Для обеспечения эффективного осаждения пыли при электрофильтрации используют ее дозарядку высоковольтными импульсами напряжением  $(30-100) \% U_{инт}$ , длительность которых (обычно это десятки-сотни микросекунд) должна соответствовать электрическим параметрам пыли. Частота следова-

ния разрядных импульсов в зависимости от удельного электрического сопротивления пыли должна находиться в диапазоне 10...1000 Гц (это условие обеспечения стабильного разряда при изменении характеристик среды в процессе работы импульсных источников питания в значительном объеме обрабатываемых выбросов). Таким образом, в зависимости от текущего состава пыли возникает необходимость управления величиной амплитуды, крутизны, длительности и частоты следования импульсов в процессе обработки для эффективного осаждения разноимпедансных составляющих.

Для деструкции экологически опасных составляющих следует провести плазмохимическое преобразование окислов углерода  $CO_x$ , серы  $SO_x$  и азота  $NO_x$  в сравнительно безопасные соединения, а также осуществить плазмохимическое преобразование высокомолекулярных канцерогенных соединений в простые, безопасные. Как показали предварительные экспериментальные исследования, деструкция возможна при создании неравномерного электрического поля напряженностью не менее 2 МВ/м, что технически можно реализовать формированием стримерного объемного разряда в газовой среде. Для образования такого разряда при атмосферном давлении без предварительной ионизации требуются высоковольтные высокочастотные импульсы с наносекундным фронтом, амплитудой от 60 до 120 кВ, длительностью от 50 до 100 мкс, частотой следования от 1 до 10 кГц в зависимости от состава газовых выбросов [1]. Итак, обеспечение результативной деструкции экологически опасных составляющих газовых выбросов возможно при изменении параметров импульсов, генерируемых импульсным высоковольтным источником питания в соответствии с текущим составом среды.

В результате проведенного изучения объекта обработки – экологически опасных газовых выбросов в электрофильтре – установлено, что в процессе фильтрации изменяется их количественный и качественный состав. Для эффективного осаждения разноимпедансных пылевых частиц и деструкции экологически опасных составляющих необходимо провести текущий контроль состава выбросов с целью корректировки параметров импульсов, генерируемых импульсным высоковольтным источником питания согласно количественному и качественному составу объекта обработки — газовых выбросов.

Обеспечение операционного контроля состава газовых выбросов потребовало проанализировать существующие газовые анализаторы. В качестве датчика газового анализатора для определения состава газовых выбросов может быть выбран первичный электрохимический преобразователь (ПЭП) массовой концентрации газовой составляющей в токовый сигнал, пропорциональный концентрации. С целью нахождения массовой концентрации различных

взвешенных пылевых частиц в газоанализаторе можно использовать измеритель оптической плотности пылегазовой среды ВГО-2 [4]. Применение газоанализаторов позволяет осуществить непосредственный текущий анализ структуры конкретной газовой смеси и установить в объеме опасных выбросов количество и весовой коэффициент наиболее значимых составляющих газовых выбросов в качестве информационных координат в системе управления.

Комплексные системы электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов могут гарантировать эффективное осаждение высокоомных пылей и деструкцию экологически опасных газовых выбросов с помощью дополнительных управляемых импульсных источников питания, генерирующих высоковольтные высокочастотные импульсы, количество и параметры которых должны быть соразмерны количеству и величине долей весомых составляющих промышленных выбросов. Обеспечить такое соответствие может создание интеллектуальной системы управления импульсными источниками питания. С целью её разработки осуществлено исследование импульсного высоковольтного высокочастотного источника питания как объекта управления для выбора каналов управляющих воздействий и информационно эффективных координат контроля. В системах электрофильтрации в качестве дополнительного импульсного источника питания используется группа генераторов высоковольтных импульсов ( $G1...GN$ ) с наносекундным фронтом для получения стримерного коронного разряда [5].

Необходимое количество генераторов ( $G1...GN$ ) в импульсном источнике питания равняется количеству весомых составляющих фильтруемых промышленных газовых выбросов и определяется по результатам предварительного анализа их состава [2].

Проведенный анализ установил информационно эффективные и аппаратно определяемые выходные координаты генератора высоковольтных импульсов: амплитуду импульса, длительность импульса, крутизну фронта импульса, частоту следования импульсов. Каналами управляющих воздействий генератора высоковольтных импульсов являются входы регуляторов напряжения и формирователей импульсов генераторов высоковольтных импульсов, входящих в состав дополнительного источника питания.

На основании изучения объекта обработки ОО (экологически опасные промышленные выбросы в электрофильтре) и объекта управления ОУ (дополнительный импульсный источник питания, состоящий из генераторов высоковольтных импульсов  $G1...GN$ ) построена обобщенная блок-схема интеллектуальной системы управления процессом очистки промышленных выбросов (рис. 1).

Координатами вектора состояния  $X$  объекта обработки (ОО) являются сигналы с газоанализатора, соответствующие весовым коэффициентам наиболее значимых составляющих промышленных выбросов. Координатами выходного вектора  $Y$  объекта управления (ОУ) есть параметры импульсов на выходе генераторов (амплитуда импульса, длительность импульса, крутизна фронта импульса, частота следования импульсов). Координаты вектора управляющих воздействий  $U$  – сигналы, поступающие на регулятор напряжения и формирователь импульсов генератора с системы управления по алгоритму, выработанному в блоке принятия решений согласно текущим значениям координат вектора состояния объекта обработки, выходного вектора объекта управления и множеству законов управления, заложенных в базу знаний, полученных по результатам предварительных экспериментальных исследований.

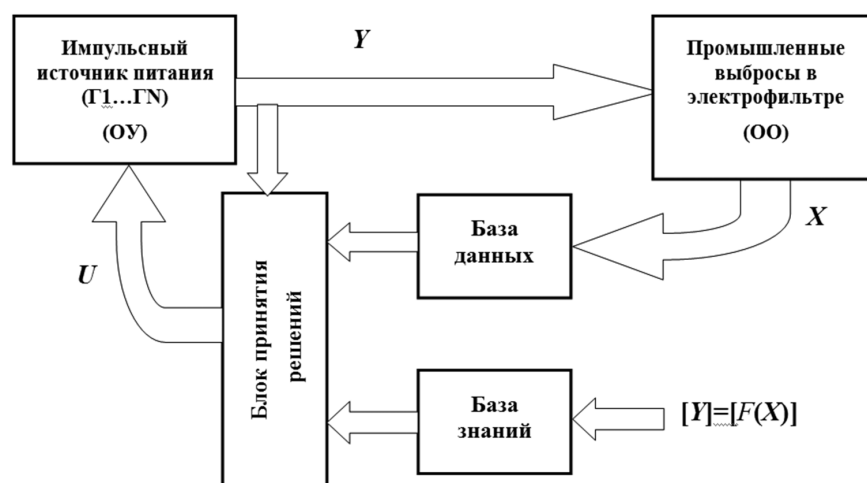


Рис. 1. Блок-схема интеллектуальной системы управления процессом очистки газовых выбросов:

$X$  — вектор состояния объекта обработки (ОО);  $Y$  — выходной вектор объекта управления (ОУ);  $U$  — вектор управляющих воздействий;  $[Y]=[F(X)]$  — множество законов управления

Для создания базы знаний необходима серия экспериментов на макетных образцах высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов [2] или на реальных установках электрофильтрации, что позволит получить множество законов управления в виде однозначного соответствия  $[Y]=[F(X)]$ . Результаты таких исследований дадут возможность определить значения параметров импульсов, генерируемых импульсным высоковольтным высокочастотным источником питания, для осаждения разноимпедансных пылевых частиц и деструкции экологически опасных газовых выбросов при различных сочетаниях составных элементов газовых выбросов и их весовых долей.

Кроме того, был синтезирован адаптивный алгоритм работы интеллектуальной системы управления импульсным высокочастотным высоковольтным источником питания систем электрофильтрации (рис. 2).

Синтезированный алгоритм реализован на промышленных контроллерах фирмы Atmel серии Mega (AtMega16, AtMega8535) и контроллерах STM 32 с ядром ARM, которые создают необходимое быстродействие управления элементами системы и имеют полный набор используемых функций, дополнительные подсистемы индикации и панели ввода информации.

При обеспечении возможности изменения базы знаний предложенная интеллектуальная система управления является универсальной и позволяет осуществлять интеллектуальное управление импульсными высоковольтными высокочастотными источниками питания комплексных систем электрофильтрации, гарантируя эффективную деструкцию и осаждение всех весомых составляющих разноимпедансных газовых выбросов при минимальных энергозатратах.

**ВЫВОДЫ.** 1. Проведены экспериментальные исследования экологически опасных промышленных газовых выбросов как объекта обработки и импульсного высоковольтного высокочастотного источника питания как объекта управления, состоящего из N генераторов высоковольтных импульсов с наносекундным фронтом. Выявлены информационно эффективные и аппаратно находимые выходные координаты генератора высоковольтных импульсов: амплитуда импульса, длительность импульса, крутизна фронта импульса, частота следования импульсов. В качестве каналов управляющих воздействий определены входы регуляторов напряжения и формирователей импульсов генераторов высоковольтных импульсов (Г1...ГN), входящих в состав дополнительного импульсного высоковольтного источника питания системы электрофильтрации. В результате построена архитектура интеллектуальной системы управления процессом очистки газовых выбросов.

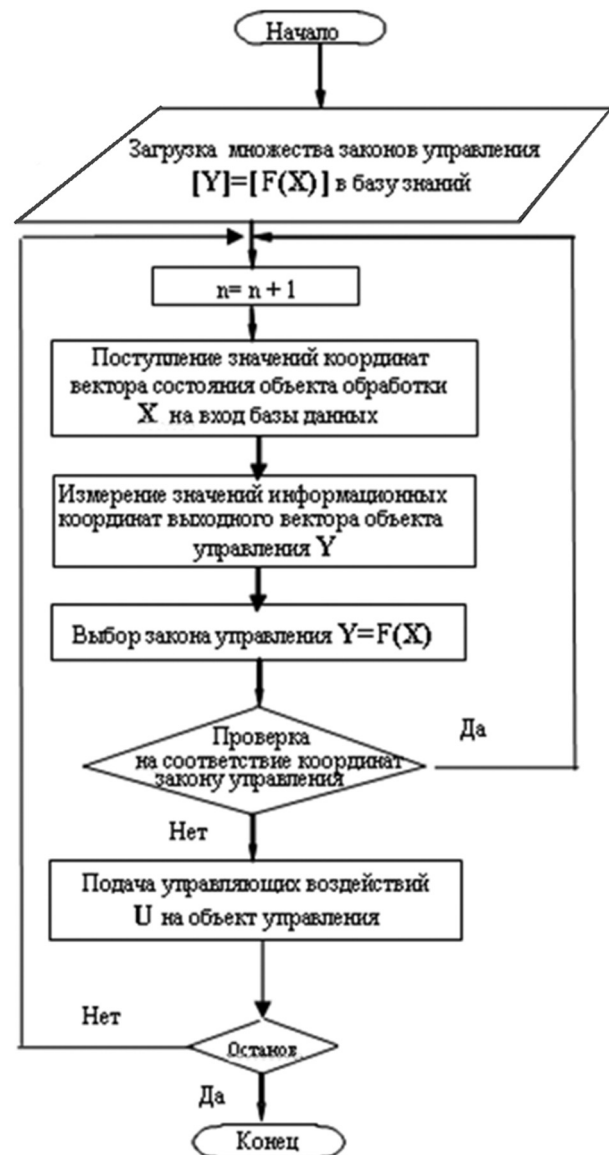


Рис. 2. Алгоритм работы интеллектуальной системы управления импульсным высокочастотным высоковольтным источником питания

2. Сформирована база знаний интеллектуальной системы управления по итогам экспериментов на макетных образцах высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации. Для получения множества законов управления установлены значения параметров импульсов, необходимые для осаждения разноимпедансных пылевых частиц и деструкции экологически опасных составляющих промышленных выбросов, при различных сочетаниях составных элементов и их весовых долей, что является основой для синтеза алгоритма управления и создания базы знаний.

3. Составлен алгоритм работы интеллектуальной системы управления импульсным высокочастотным источником питания системы электрофильтрации,

обеспечивающий управление параметрами импульсов генераторов, входящих в структуру источника питания, в соответствии с текущим составом промышленных газовых выбросов. Это дает возможность генерировать высоковольтные импульсы с параметрами, позволяющими вести эффективную деструкцию всех экологически опасных весомых составляющих и осаждение разноимпедансных пылевых частиц в процессе обработки промышленных газовых выбросов при минимальных энергозатратах.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Влияние режимов работы высоковольтного источника питания на формирование стримерного коронного разряда и эффективность систем газоочистки [Текст] / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, Ю. Г. Казарян, Н. С. Ярошинский // *Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність*. — Ч. 1. — 2011. — С. 44–49.
- [2] Создание макетных образцов высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов [Текст] / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, В. В. Диордийчук, Д. В. Винниченко, Н. С. Ярошинский // *Вестник «ХПИ»*. Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». — Харьков : НТУ «ХПИ», 2012. — № 52 (958). — С. 31–39.
- [3] **Богуславский Л. З.** Электрофильтрация разноимпедансных газовых выбросов в комплексной системе пылегазоочистки экологически опасных промышленных объектов [Текст] / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко // *Вестник «ХПИ»*. Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». — Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. — № 21. — С. 12–16.
- [4] Газоаналитические приборы, ЗАО «Украналит» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.ukranalyt.com.ua/index4\\_0.htm](http://www.ukranalyt.com.ua/index4_0.htm).
- [5] **Пат. 50169** Україна, МПК Н03К 3/53 (2006.01). Генератор високовольтних імпульсів з наносекундним фронтом для отримання стримерного коронного розряду / Богуславський Л. З., Мирошниченко Л. М., Казарян Ю. Г., Христо О. І.; заявник та патентовласник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. с № u 2009 12959; заявл. 14.12.09; опубл. 25.05.10. Бюл. № 10.
- [6] **Пат. 90293** Україна, МПК (2014) В01Д 53/32 (2006.01) С10К 1/00 Н1Т 19/00. Спосіб деструкції різноімпедансних газових викидів небезпечних промислових об'єктів / Богуславський Л. З., Мирошниченко Л. М., Диордийчук В. В.; заявник та патентовласник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. — № u 2013 11731; заявл. 04.10.13; опубл. 26.05.14. Бюл. № 10.
- [7] **Пат. 95858** Україна, МПК (2014.01) Н03К3/53 В01Д 53/32 С10К 1/00. Система імпульсного електроживлення електрофільтрів для очищення різноімпедансних газових викидів / Богуславський Л. З., Мирошниченко Л. М., Овчиннікова Л. С.; заявник та патентовласник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. — № u 2014 07889; заявл. 14.07.14; опубл. 12.01.15. Бюл. № 1.
- [8] **Родионов А. И.** Технологические процессы экологической безопасности [Текст] / А. И. Родионов, В. Н. Клущин, В. Г. Систер. — Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. — 800 с.
- [9] **Чекалов Л. В.** Основы разработки и конструирования электрофильтров нового поколения [Текст] / Л. В. Чекалов // *ИнформЦемент*. — 2006. — № 5. — С. 67–69.

© Л. З. Богуславський, Л. Є. Овчиннікова, С. С. Козирев

Надійшла до редколегії 01.01.17

Статтю рекомендує до друку  
д-р техн. наук, проф. *О. Н. Сизоненко*