

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-479-487

УДК 628.16.087+631.171:636.5

## **Концептуальные основы энергоэффективной системы управления комбинированными системами водоочистки**

**В. Н. Штепа<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Полесский государственный университет (Пинск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** Проведен критический анализ недостатков существующих систем водоочистки. Предложено для обеспечения экологической безопасности и экономии энергетических ресурсов использовать комбинированные установки, включающие физические, химические, физико-химические и биологические методы. Акцентировано внимание на том, что наиболее актуальным способом поддержания эффективной водоочистки являются адаптивные системы управления. Проанализированы недостатки управления установками водоочистки и предложено производить их синтез на основе математического аппарата систем искусственного интеллекта. С учетом требований экологической безопасности и необходимости экономии энергетических ресурсов разработан критерий энергоэффективности функционирования комбинированных систем. На промышленном предприятии (очистка сточных вод забойного цеха) проведена проверка соответствия этого критерия производственным условиям, которая подтвердила его адекватность и целесообразность использования при синтезе энергоэффективных систем управления. Предложена последовательность синтеза системы управления комбинированными установками водоочистки. Базируясь на предварительных исследованиях и анализе современных работ в данной проблемной области, разработана архитектура системы управления комбинированными установками водоочистки, использующая интеллектуальные технологии. Отличие данной разработки от аналогов заключается в возможности адаптивной корректировки настроек оборудования на основе обработки показаний датчиков, информации о цене на расходные материалы в условиях действия нештатных ситуаций. Подстройка параметров системы управления осуществляется с использованием экспериментально-аналитических данных, сохраняемых в базе знаний технологических процессов.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, экологическая безопасность, водоочистка, система управления, искусственный интеллект

**Для цитирования:** Штепа, В. Н. Концептуальные основы энергоэффективной системы управления комбинированными системами водоочистки / В. Н. Штепа // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 5. С. 479–487

---

### **Адрес для переписки**

Штепа Владимир Николаевич  
Полесский государственный университет  
ул. Кирова, 24,  
225710, г. Пинск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 444 65-73-14  
box@polessu.by

### **Address for correspondence**

Shtepa Vladimir N.  
Polesky State University  
24 Kirova str.,  
225710, Pinsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 444 65-73-14  
box@polessu.by

---

## Conceptual Bases of the Energy Efficient System of Management of Combined Units of Wastewater Treatment

V. N. Shtepa<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Polesky State University (Pinsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** A critical analysis of the shortcomings of the existing water purification systems is conducted. In order to ensure environmental safety and energy savings it is proposed to use the combined units, including physical, chemical, physical-and-chemical and biological methods. The attention is driven to the fact that the most effective way to maintain current water purification is an adaptive control system. The shortcomings of the management of water treatment units were revealed and it was proposed to produce their synthesis based on the mathematical apparatus of artificial intelligence systems. Taking into account the requirements of the environmental safety and the need in the energy savings, the energy efficiency criteria of combined system functioning has been developed. At an industrial plant (slaughterhouse wastewater treatment) the compliance of the production conditions of the criterion has been undertaken that confirmed the criterion relevance and usefulness as applied to the synthesis of energy-efficient control systems. A synthetic control system combined the water treatment plants. Having based on the preliminary research and analysis of the current work in the subject area the architecture of a control system of combined water treatment units that use intelligent technology was developed. The key functional of the unit – information-analytical subsystem of the formation control actions including: multi-layer perceptrons self-organization Kohonen network, fuzzy cognitive map. The basic difference between the developed design and its analogues is the ability to adjust the settings of equipment adaptively on the basis of processing sensor data, information on the price of consumables, volley discharges of pollutants, a sudden change in the flow and other force majeure. Adjustment of the parameters of the control system is carried out with the use of experimental and analytical data stored in the knowledge base of technological processes.

**Keywords:** energy efficiency, environmental safety, water treatment, control system, artificial intelligence systems

**For citation:** Shtepa V. N. (2016) Conceptual Bases of the Energy Efficient System of Management of Combined Units of Wastewater Treatment. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (5), 479–487 (in Russian)

### Введение

С учетом многофакторности требований к нормативам воды и большой разновидности загрязнителей [1] для достижения необходимого качества очистки на промышленных предприятиях используют комбинированные системы. Они комплексно включают известные методы [2]: механические, химические, физико-химические и биологические. Однако, как показала практика, обобщенными функциональными недостатками таких методов являются [2, 3]:

- высокая стоимость очистки 1 м<sup>3</sup> воды (при условии получения соответствующего качества очистки);
- наличие больших объемов опасных продуктов очистки (реагент + загрязнитель), которые необходимо утилизировать;
- неспособность противодействовать залповым выбросам загрязнителей;
- отсутствие работы в режиме реального времени (постоянная задержка между появлением загрязнителя и технологической реакцией системы).

Например, значение Coli-index воды (критерий санитарно-гигиенического качества воды – наличие опасных концентраций вирусов, микробов, бактерий) определяют минимум через 24 ч с момента отбора пробы. Как следствие – возможна ситуация, когда на предприятие 24 ч поступают опасные загрязнители, причем самые современные очистные системы на это никак не реагируют.

Все описанные современные методы удаления загрязнителей из сточных вод требуют применения электротехнических комплексов. Степень вовлечения электротехнологий составляет 15–90 % [4]. При этом, как одни из самых интенсивных и прогрессивных, выделяются физико-химические методы, где электротехнологии лежат в основе водоочистки: электрокоагуляция, электрофлотация, электродиализ, электродеструкция, озонирование и другие методы. Они дают возможность с помощью изменения электрических параметров управлять направлением и характером реакций удаления вредных и опасных загрязнителей воды [2–4]. Однако процессы, происходящие в таких электротехнологических установках, в зависимости от входных показателей сточных вод все равно сопровождаются явлениями перерасхода электроэнергии и/или уменьшением эффекта очистки [4].

К эффективным и унифицированным методам предотвращения перерасхода электроэнергии и повышения качества очистки воды следует отнести использование адаптивных систем управления (АСУ) электротехническими комплексами, способных поддерживать технологические параметры в энергоэффективных пределах при условии соблюдения требований к качеству водоочистки [5]. Существенный лимитирующий фактор эффективного использования АСУ – фактическая невозможность адекватного математического моделирования всех процессов, проходящих в условиях работы на реальных объектах [6].

### Критерий энергоэффективности систем водоочистки

Классическая экология при установлении опасности предприятий (процессов) базируется, прежде всего, на максимальной минимизации выбросов. Например, безразмерный интегральный показатель экологической опасности, который отражает комплексную сравнительную оценку ее уровня с учетом внешних и внутренних факторов, равен

$$R_{\text{инт}} = K_{\text{оз}} K_{\text{люд}} K_{\text{тер}} S V_{\text{а}} V_{\text{в}} V_{\text{от}} V_{\text{фв}} K_{\text{н}}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{оз}}$  – коэффициент озеленения зоны действия;  $K_{\text{люд}}$  – то же населения ареала;  $K_{\text{тер}}$  – то же ценности территории;  $K_{\text{н}}$  – то же нормальной экологической безопасности;  $S$  – площадь действия опасностей;  $V_{\text{а}}$  – показатель превышения нормативного объема выбросов вредных веществ в атмосферу;  $V_{\text{в}}$  – то же нормативного объема выбросов вредных веществ в воду;  $V_{\text{от}}$  – то же нормативного объема отходов;  $V_{\text{фв}}$  – то же нормативных уровней физических воздействий.

Очевидно, что такой критерий невозможно использовать для динамической настройки параметров оборудования в режиме реального времени, чтобы не выйти при этом за пределы экологической безопасности в конце отчетного периода. Безусловно, экологическая безопасность окружающей среды является главным критериальным ограничением функционирования производства. Однако целесообразно учитывать также качество работы оборудования, эффективность использования энергетических ресурсов. При этом добыча энергетических ресурсов наносит непоправимый вред окружающей среде, что не отображается в (1). Такие утверждения касаются и других нормативных формул расчета экологического воздействия производства на окружающую среду.

С учетом производственных испытаний и теоретических наработок [1, 4] предлагается универсальный критерий оценки энергоэффективности работы электротехнологического оборудования водоподготовки

$$EF_y = \frac{\left[ \left( \frac{L_{\text{вых}} - L_{\text{задан}}}{L_{\text{задан}}} \cdot 100 \% \right) + \dots + \left( \frac{LN_{\text{вых}} - LN_{\text{задан}}}{LN_{\text{задан}}} \cdot 100 \% \right) \right] \sum_{i=1}^N Q_i}{\sum_{i=1}^N W_i}, \quad (2)$$

где  $L_{\text{вых}}$  – фактическое значение соответствующего параметра оценки качества водоочистки;  $L_{\text{задан}}$  – заданное (нормативное) значение соответствующего параметра оценки качества водоочистки;  $Q$  – время работы оборудования, ч;  $W$  – электроэнергия, затраченная на водоочистку, кВт·ч;  $N$  – количество параметров оценки качества водоочистки (как правило, соответствует количеству установок, очищающих воду).

Технологическая задача – поддерживать значение критерия, равным (максимально близким) нулю. В случае, если одна установка обеспечивает нормирование нескольких параметров:

$$EF_y = \frac{\left[ \left( \frac{L_{\text{вых}} - L_{\text{задан}}}{L_{\text{задан}}} \cdot 100 \% \right) + \dots + \left( \frac{LN_{\text{вых}} - LN_{\text{задан}}}{LN_{\text{задан}}} \cdot 100 \% \right) \right] Q}{W}. \quad (3)$$

Производственную оценку соответствия коэффициента энергоэффективности проводили на электрокоагуляторе с нейросетевой АСУ (производство компании «Кий Проминвест Групп») [1]. Локальная схема очистки воды после убойного цеха предприятия была традиционной:

- жироловка с автоматическим сбором и удалением жира;
- пероуловитель с механической системой удаления задержанного пера птицы.

Функциональные показатели данного технологического оборудования соответствовали нормативным требованиям (пера в потоке сточных вод фактически не было, содержание жира 10–15 мг/л при входной концентрации взвешенных частиц 330–360 мг/л). Сточные воды после локальной очистки самотеком попадали на основные очистные сооружения населенного пункта.

Предприятие ежедневно в одну смену (8 ч) тратит 15–20 м<sup>3</sup> холодной воды на мойку технологического оборудования (в том числе автомобильного транспорта). Вода забиралась из артезианской скважины, хотя специальных требований к ее качеству не выдвигалось. Было предложено применить доочистку сточных вод с последующим их использованием в технологическом цикле – создание частичного замкнутого цикла водоснабжения. Исследования проводились на протяжении двух недель (касательно каждого способа функционирования оборудования) из расчета, чтобы за один календарный месяц закончить полный цикл производственных экспериментов (исходя из технологического анализа предприятия установили, что такой период включает базовые пиковые значения концентраций загрязнителей). Для достижения соответствующего ресурсосберегающего эффекта локальную схему очистки, учитывая эффективность функционирования жироловки и пероуловителя, дополнили электрокоагуляционной системой с растворимыми стальными электродами [1].

При использовании нейросетевой АСУ электрокоагулятором водосбережение составило 263,00 м<sup>3</sup> за две недели; энергосбережение на электрокоагуляцию 215,66 кВт·год в расчете на две недели. При этом коэффициент энергоэффективности водоочистки, согласно (2) в единицах измерения загрязнителя (концентрации взвесей), с использованием АСУ улучшился на 54 % по сравнению с работой без системы управления (рис. 1).

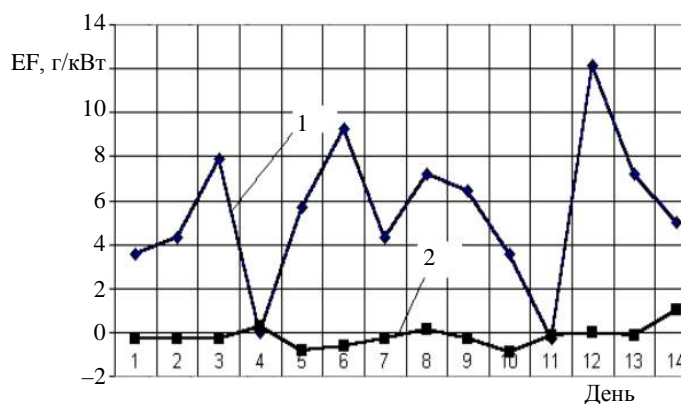


Рис. 1. Энергоэффективность электрокоагуляционной очистки:  
1 – без адаптивной системы управления (АСУ); 2 – с АСУ

Fig. 1. The energy efficiency of electrocoagulation purification:  
1 – without an adaptive control system (ACS); 2 – with ACS

### Объектно-ориентированная концепция создания энергоэффективных систем управления комбинированными установками водоочистки

Ключевая задача систем управления установками водоочистки – поддержание режимов работы, при которых обеспечивается экологическая безопасность, поддерживается максимально около нуля критерий энерго-

эффективности (2). Синтез систем управления водоочисткой должен базироваться на понимании, что двух одинаковых объектов не существует, а есть типовые методы удаления загрязнителей. Исходя из такой трактовки и недостатков имеющихся решений, можно сформулировать последовательность объектно-ориентированного создания таких систем (рис. 2):

1) исследование характеристик водопользования объекта, а не только качества воды;

2) проведение экспериментальных исследований с целью определения методов и режимов водоочистки – согласно требованиям по критерию энергоэффективности (2);

3) информационно-аналитические исследования на основе пунктов 1 и 2 с целью выбора объектно-ориентированных номенклатуры и режимов функционирования оборудования;

4) синтез систем управления на основе разработок искусственного интеллекта с возможностью адаптации в режиме реального времени характеристик и структуры (на основании результатов пунктов 1 и 2);

5) апробация АСУ на реальном объекте (проведение коррекции при необходимости) с последующими монтажом и наладкой технических средств автоматизации.

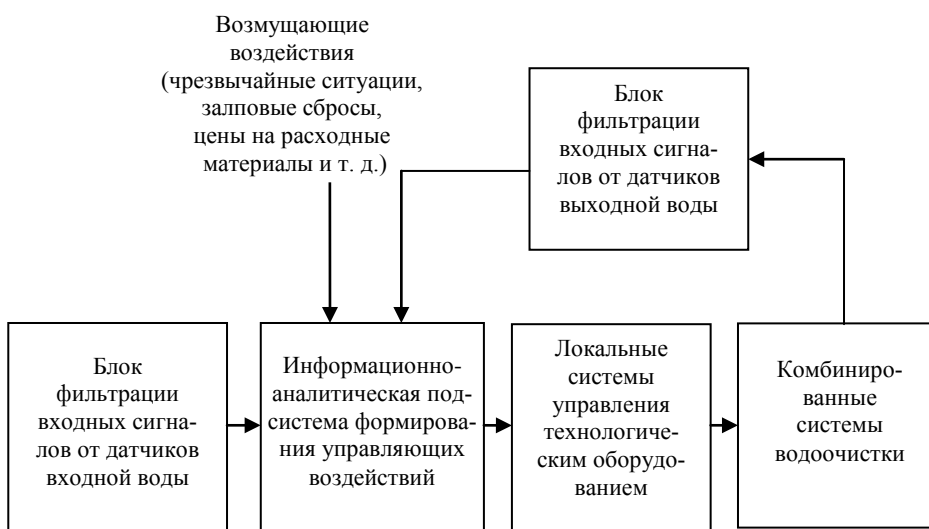


Рис. 2. Архитектура системы управления комбинированными системами водоочистки

Fig. 2. The architecture of control system of combined water purification units

Математический аппарат соответствующих элементов АСУ:

- блоки фильтрации сигналов от датчиков – преобразование Гильберта – Хуанга [5];

- информационно-аналитическая подсистема формирования управляющих воздействий (ПФУВ) – нечеткие когнитивные карты, самоорганизационные карты Кохонена, нейронные сети: вероятностная и многослойный персептрон [6–10];

• локальные системы управления – классические законы теории автоматического управления.

Важные параметры процессов сохраняются в базе данных и используются для корректировки настроек, в том числе в режиме реального времени. Такая архитектура свободно интегрируется в современные SCADA-системы. На стадии проектирования АСУ используются CASE-средства и объектно-ориентированный язык разработки UML. При создании АСУ информационно-аналитическая ПФУВ (рис. 3) обучается и проверяется на адекватность в пунктах 3–5 этапов проектирования.

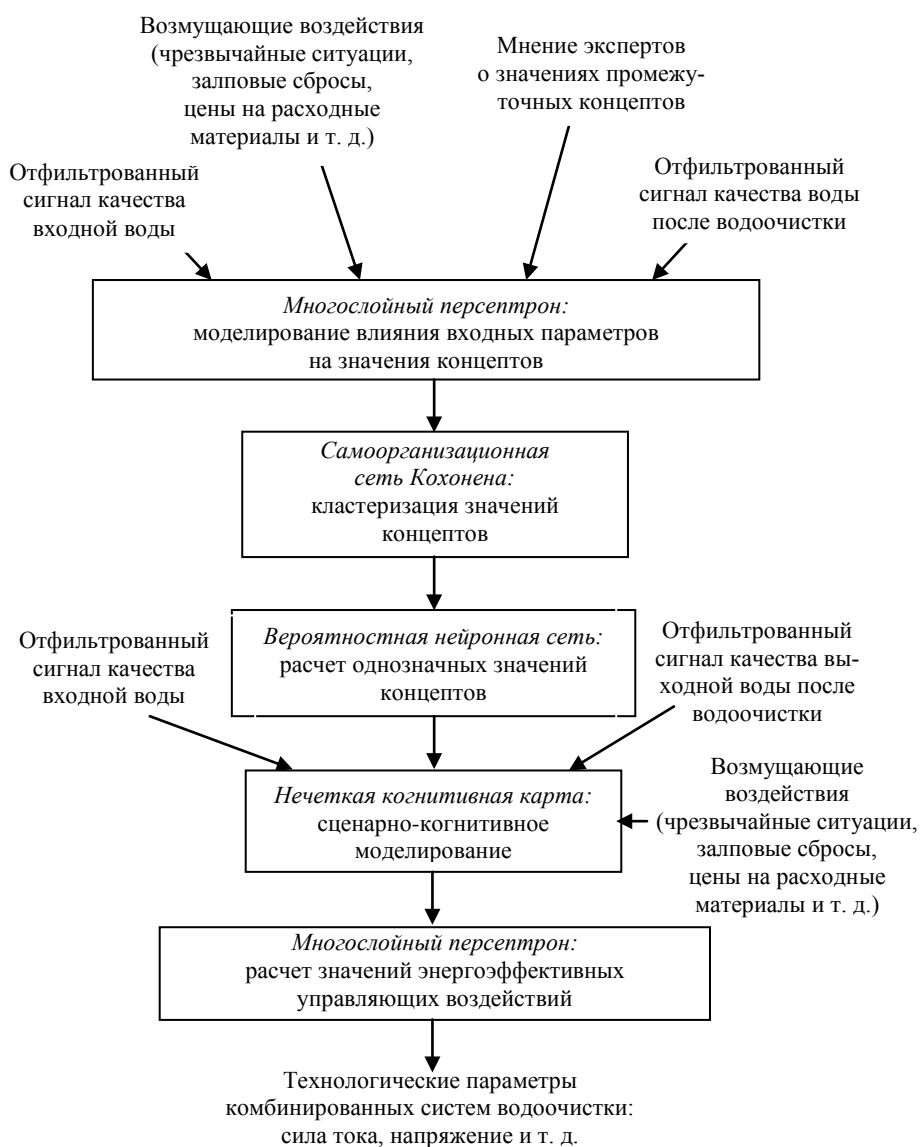


Рис. 3. Архитектура информационно-аналитической подсистемы формирования управляющих воздействий (режим реального времени)

Fig. 3. Architecture of information-analytical subsystem of formation of control actions (real-time)

ПФУВ решает задачу моделирования и адаптивного формирования в режиме реального времени стратегии управления комбинированными системами водоочистки. Важная особенность работы предложенной АСУ заключается в учете действия непредвиденных факторов: чрезвычайных ситуаций, залповых сбросов загрязнителей, пиковых повышений расходов и т. д. Требования к адаптивности подсистемы вызваны нестационарностью процессов и возмущающих воздействий, которые способны изменить мнение экспертов о значениях концептов.

Функциональные задачи блоков ПФУВ:

- *многослойный перцептрон*: моделирование значений концептов когнитивной модели на основании базы знаний предварительных экспериментов с учетом критерия энергоэффективности (2), при этом мнение экспертов учитывается при выборе значений концептов эффективности и состояния оборудования;

- *самоорганизационная сеть Кохонена*: группировка и кластеризация значений концептов когнитивной карты;

- *вероятностная нейронная сеть*: выбор числовых значений концептов когнитивной карты;

- *нечеткая когнитивная карта*: расчет проведения сценарно-когнитивного моделирования;

- *многослойный перцептрон*: расчет энергоэффективных управляющих воздействий (на основании сценарно-когнитивного моделирования и предварительных экспериментов с учетом критерия энергоэффективности (2)).

## ВЫВОДЫ

1. Для обеспечения экологической безопасности и экономии энергетических ресурсов необходимо использовать комбинированные системы водоочистки с адаптивными системами управления.

2. Предложенный критерий энергоэффективности функционирования комбинированных систем водоочистки можно рекомендовать для использования при синтезе соответствующих систем управления, что подтверждено производственными испытаниями.

3. Архитектура системы управления, решающая проблему энергоэффективного функционирования комбинированных установок водоочистки, должна включать элементы с искусственным интеллектом и базироваться на объектно-ориентированных исследованиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Очистка растворов от дисперсных примесей методом электрокоагуляции. Ч. 2. Осаждение глинистых примесей при переменных гидродинамических режимах, факторный эксперимент / М. Донченко [и др.] // Вісник Національного технічного університету. Хімія, хімічна технологія та екологія. 2009. № 22. С. 57–65.
2. Штепа, В. Н. Концепция построения интеллектуальных систем управления биотехническими объектами с учетом влияния природных факторов / В. Н. Штепа // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: труды 9-й Междунар. науч.-техн. конф. М., 2014. Ч. 5. С. 14–19.



3. Theoretical Issues Construction and Operation of Agricultural Mission Robotic System / S. Shvorov [et al.] // *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Agriculture*. 2012. No 60. P. 97–102.
4. Штепа, В. М. Оцінка енергетичних характеристик процесів очищення стічних вод агропромислових підприємств електротехнічними комплексами / В. М. Штепа // *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2014. Вип. 194, ч. 3. С. 259–265.
5. Greenhouse Environmental Control System with Neural Network Predictions of External Disturbances / A. Dudnik [et al.] // *Contemporary Aspects of Production Engineering: XXII International Students Scientific Conference, 22–25 May 2013: abstract*. Warsaw, 2013. P. 40–52.
6. Intelligent Effective Management System of Biotechnical Objects Based on Natural Disturbances Prediction / V. Lysenko [et al.] // *Earth Bioresources and Life Quality*. 2014. Vol. 3. P. 34–41.
7. Kohonen, T. *Self-Organizing Maps* / T. Kohonen. New York: ORM, 2001. 501 p.
8. Lakhmi, C. J. *Fusion of Neural Networks. Fuzzy Systems and Genetic Algorithms: Industrial Applications* / C. J. Lakhmi, N. M. Martin. Deli: CRC Press LLC. 1998. P. 154–165.
9. Каллан, Р. *Основные концепции нейронных сетей* / Р. Каллан. М.: Вильямс, 2001. 516 с.
10. Гареев, А. Ф. *Применение вероятностной нейронной сети для задачи классификации текстов* / А. Ф. Гареев // *Наука и образование*. 2004. № 11. С. 105–117.

Поступила 25.05.2015    Подписана в печать 08.02.2016    Опубликовано онлайн 26.09.2016

#### REFERENCES

1. Donchenko M., Sribnaya O., Goncharov F., Shtepa V. (2009) The Purification of Solutions from Dispersed Impurities by Electrocoagulation. Part 2. Deposition of Clay Impurities in Variable Hydrodynamic Conditions, Factorial Experiment. *Novosti Natsionalnogo Tehnichnogo Universitetu. Khimiia, Khimichna Tekhnologii ta Ekologii* [News of the National Technical University. Chemistry, Chemical Engineering and Environment], (22), 57–65 (in Russian).
2. Shtepa V. N. (2014) Concept of Smart Control Systems of Biotechnical Facilities Creation Accounting the Influence of Natural Factors. *Energoobespechenie i Energoberezhnie v Selskom Khoziaistve: Trudy 9-i Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii* [Energy Supply and Energy Efficiency in Agriculture. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Scientific Conference]. Moscow, All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture. Part 5. 14–19 (in Russian).
3. Shvorov S., Reshetyuk V., Bolbot I., Shtepa V., Chirchenko D. (2012) Theoretical Issues Construction and Operation of Agricultural Mission Robotic System. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Agriculture*, (60), 97–102.
4. Shtepa V. M. (2014) Assessment of the Energy Characteristics of Processes of Wastewater Treatment of Agroindustrial Enterprises by Electrotechnical Complexes. *Naukovii Visnik Natsionalnogo Universitetu Bioresursiv i Prirodokoristuvannia Ukraini* [Scientific Bulletin of National Agricultural University of Ukraine], 194, Part 3, 259–265 (in Ukrainian).
5. Dudnik A., Lysenko V., Reshetyuk V., Shtepa V. (2013) Greenhouse Environmental Control System with Neural Network Predictions of External Disturbances. *Contemporary Aspects of Production Engineering: XXII International Students Scientific Conference, 22–25 May 2013: Abstract*. Warsaw, 40–52.
6. Lysenko V., Golovinskiy B., Reshetyuk V., Shtepa V., Shcherbatyuk V. (2014) Intelligent Effective Management System of Biotechnical Objects Based on Natural Disturbances Prediction. *Earth Bioresources and Life Quality*, 3, 34–41.
7. Kohonen T. (2001) *Self-Organizing Maps*. New York, ORM, 501.
8. Lakhmi C. J., Martin N. M. (1998) *Fusion of Neural Networks. Fuzzy Systems and Genetic Algorithms: Industrial Applications*. Deli, CRC Press LLC, 154–165.
9. Callan R. (2001) *Basic Concepts of Neural Networks*. Moscow, Williams, 516 (in Russian).
10. Gareyev A. F. (2004) Application of Probabilistic Neural Networks for Text Classification Problem. *Nauka i Obrazovaniye* [Science and Education], (11), 105–117 (in Russian).

Received: 25 May 2015

Accepted: 8 February 2016

Published online: 26 September 2016