

## СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

**М. Ф. СТАРОДУБ**, доктор біологічних наук

**С. А. ШВОРОВ**, доктор технічних наук

**Д. С. КОМАРЧУК**, кандидат технічних наук

**В. Є. ЛУКІН**, кандидат педагогічних наук

**П. Г. ОХРИМЕНКО**, інженер

*Національний університет біоресурсів і природокористування  
України*

*e-mail: sosdok@i.ua*

**Анотація.** Запропоновано функціональну структуру системи оптимального керування електротехнічним комплексом (ЕТК) біогазової установки (БГУ), що забезпечує отримання максимальних об'ємів біогазу та органічних добрив на основі переробки різних видів субстратів та використання спеціальних домішок. Розглянуто основні задачі щодо оптимального дозування та перетворення у біогаз різних видів енергетичних культур та інших органічних відходів.

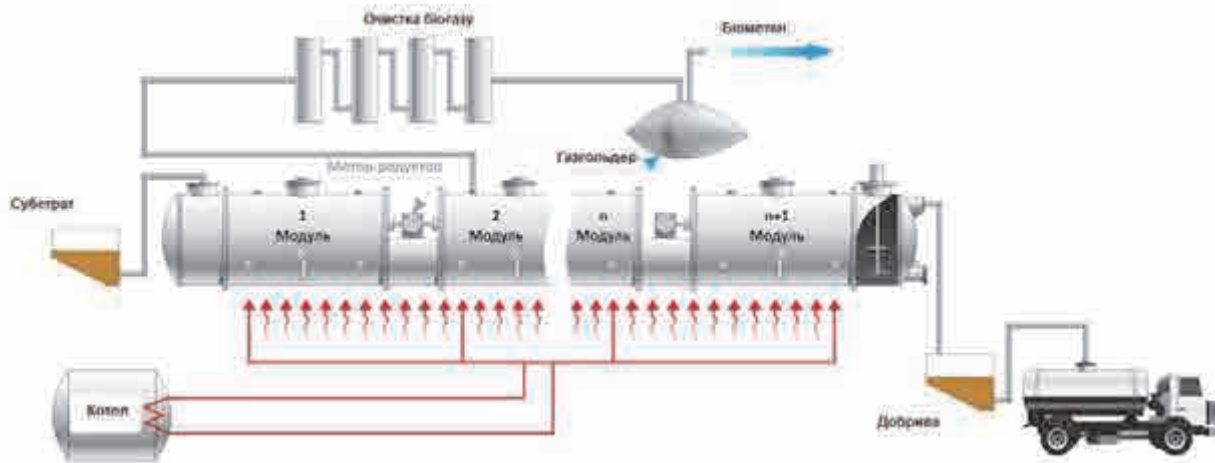
**Ключові слова:** оптимальна система керування, електротехнічний комплекс, біогазова установка, органічна сировина, біогаз, енергетичні культури, біометан

Одним із важливих секторів відновлюваних джерел енергії у світі є виробництво та енергетичне використання біогазу. Отримання максимально можливих об'ємів біометану планується на основі використання не лише різноманітних відходів з ферм, а й вирощування та збір спеціальних енергетичних культур (ЕК) і ензимів. Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності функціонування біогазових установок є розробка спеціальної системи оптимального керування щодо завантаження БГУ різними видами субстратів та створення необхідних умов для отримання максимально можливого об'єму біогазу та органічних добрив при часових і вартісних обмеженнях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** свідчить, що фіксоване дозування вхідних субстратів визначається ще на етапі конструювання БГУ. У встановленому технологічному процесі не передбачається застосування у БГУ різних видів сезонної біомаси. При цьому, неоптимальне керування процесом завантаження різних видів субстратів може призвести до значного зменшення виходу біогазу. Перспективним напрямом усунення зазначеного недоліку є розробка та використання в математичному забезпеченні системи керування БГУ спеціального методу оптимального дозування вхідних субстратів та необхідних каталітичних домішок.

**Мета досліджень** – розробка методу та системи оптимального керування ЕТК БГУ щодо дозування вхідних субстратів і спеціальних домішок для отримання максимальних об'ємів біогазу.

**Матеріали і методика досліджень.** Одним із напрямів інтенсифікації процесів зброджування є оптимальне дозування та деструкційна (кавітаційна) обробка різних видів сировини, оптимальне підігрівання й перемішування завантаженого субстрату. При цьому перспективним напрямом інтенсифікації біогазових установок є застосування багатомодульних БГУ (рис. 1).



**Рис. 1. Багатомодульна БГУ**

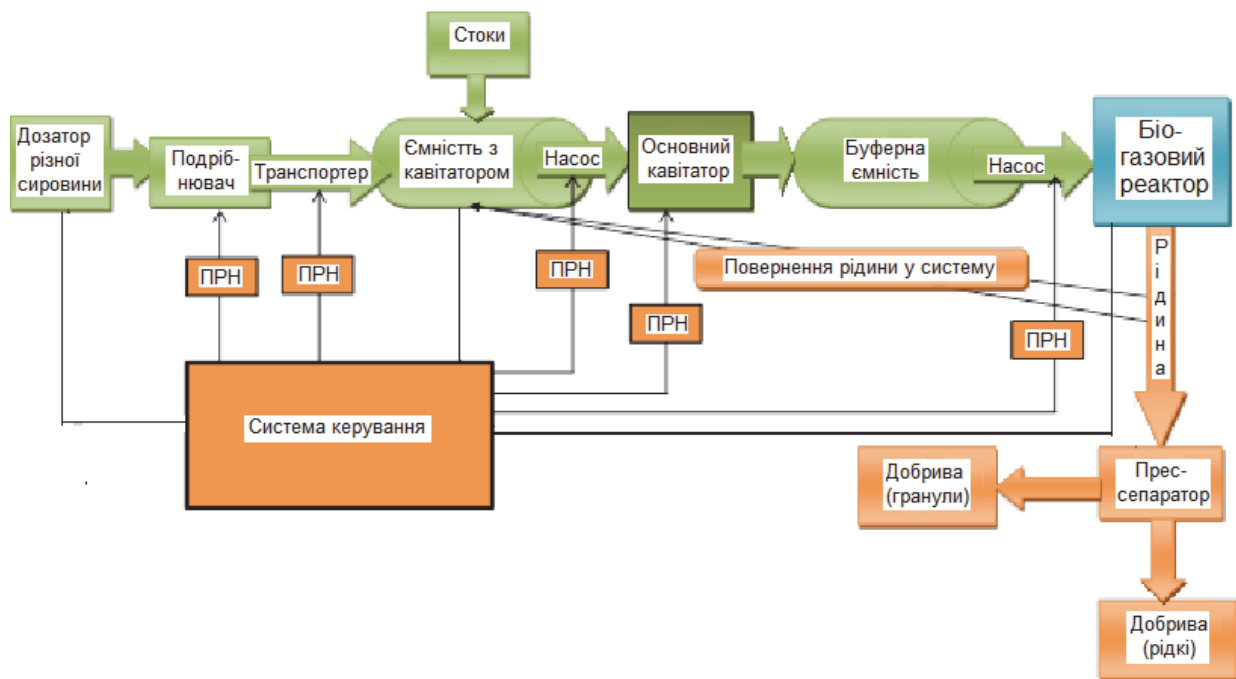
Інтенсифікація біоенергетичної утилізації приводить не лише до збільшення виходу біогазу, але й до значного зменшення площі, що займають ці споруди. Такі процеси потребують продуктивного керування складними системами метанового бродіння та побудови спеціальної системи керування (СК) електротехнічним комплексом БГУ (рис. 2).

Загальний напрям у системному проектуванні СК – це проектування системи оптимального керування ЕТК БГУ для отримання максимальних об'ємів біогазу.

**Результати досліджень.** Як показують результати теоретичних та практичних досліджень, найбільший вихід біометану, дають субстрати з високою концентрацією енергії: свіжа трава, бадилля буряка, кукурудзя, зернові рослини [1, 2]. Найменший вихід біогазу з органічного сухого субстрату має солома.

За допомогою системи керування ЕТК БГУ повинні забезпечуватися такі ключові умови виробництва біогазу.

Бактерії можуть активно працювати тільки в умовах відсутності кисню, тобто в анаеробних умовах. У системі керування біогазової установки спочатку передбачено дотримання цієї умови. При цьому виробництво біогазу здійснюється лише у вологому середовищі, адже лише за таких умов бактерії можуть функціонувати.



**Рис. 2. Структура електротехнічного комплексу багатомодульної БГУ:**  
ПРН – плавний регулятор напруги

Оптимальним режимом для всіх груп бактерій є діапазон температур 35–40о С, що також забезпечується системою керування ЕТК БГУ з урахуванням прогнозованої температури навколишнього середовища.

У процесі бродіння кількість виробленого газу поступово зростає відповідно до збільшення його тривалості, причому спочатку воно відбувається швидше, а в міру зростання тривалості бродіння – повільніше. У результаті настає такий момент, коли подальше перебування у ферментаторі буде недоцільне з економічної точки зору.

Гідролізні й кислотоутворюючі бактерії в середовищі з рівнем рН 4,5–6,3 досягають оптимуму своєї активності, тоді як бактерії, що утворюють оцтову кислоту і метан, можуть жити лише при нейтральному або при слаболужному рівні рН 6,8–8. Для всіх бактерій дійсним є правило: якщо рівень рН перевищує оптимальний, то вони стають менш активними у своїй життєдіяльності, що затримує утворення біогазу.

Відомо, що співвідношення вуглецю до азоту в різних типах гнойових відходах свиней та в рідких відходах ВРХ здебільшого не перевищує значення 15, а для стабільного протікання процесу метанового бродіння оптимальним співвідношенням є діапазон 10-30:1. Натомість, співвідношення вуглецю до азоту в ЕК здебільшого перевищує значення 30. Очевидно, що змішування гнойових відходів та ЕК дасть змогу оптимізувати склад суміші за співвідношенням вуглецю до азоту, що свідчить про доцільність їх сумісного збродження.

Процес інтенсифікації виходу біогазу полягає в тому, що потік різних видів біомаси у модулях БГУ подрібнюється до необхідного мікроскопічного рівня та гомогенізується. За допомогою спеціального

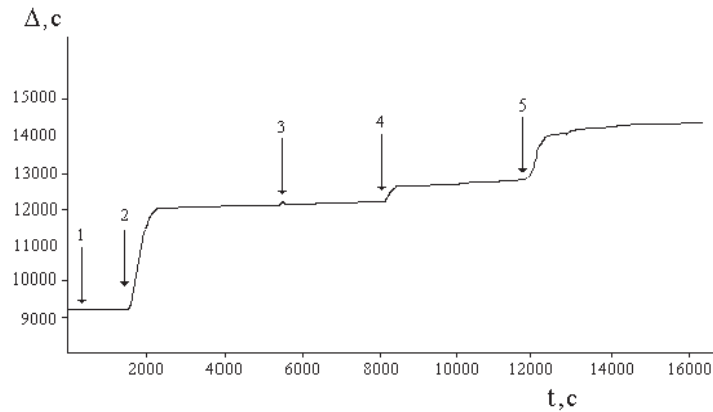
оптичного імунного біосенсору на основі поверхневого плазмового резонансу (ППР) визначається кількість та інтенсивність росту мікробної популяції у збродженій біомасі, що необхідно для оптимального дозування різних видів ЕК та спеціальних домішок, які в комплексі з кавітаційними деструкторами біомаси дадуть змогу значно збільшити вихід біогазу для отримання різних видів енергії.

Оптичний імунний біосенсор розроблюється на основі принципу ППР та відпрацьовується базовий алгоритм для оцінки інтенсивності росту мікробної популяції у збродженій біомасі під час переробки біомаси та домішок у біогазовій установці. Для цього, отримуються поліклональні антисироватки до генералізованої мікробної популяції, а з них виділяються специфічні антитіла у вигляді імуноглобулінів G. Останні використовуються в якості специфічних селективних сайтів для кількісної біосенсорної ідентифікації відповідних мікробних клітин. Щоб досягти високої чутливості аналізу, поверхня трансдюцера біосенсора попередньо оброблюється проміжними шарами. У процесі оптимізації цього процесу використовуються шари з ряду поліелектролітів та деяких білків стафілококу. Сенсорна діаграма аналізу подана на рис. 3, з якого видно, як змінюється резонансний кут ППР за умови контакту трансдюцерної поверхні з різними компонентами.

Попередньо отримані результати за кількісною оцінкою специфічних вищезгаданих базових груп бактерій у досліджуваному середовищі за допомогою оптичного ППР біосенсора подано на рис. 4. З огляду отриманих результатів, можна впевнено стверджувати, що чутливість аналізу досягає значного рівня, а головне, вона покриває діапазон коливання концентрації мікробних клітин для забезпечення оптимального стану каталітичного процесу бродіння. Наведені дані добре узгоджуються з раніше отриманими нами результатами щодо кількісного тестування деяких патогенних бактерій [3, 5].

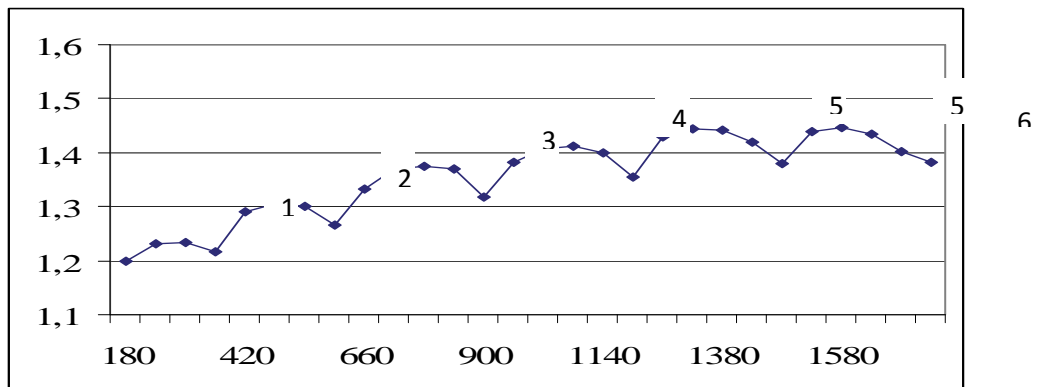
Робоча гіпотеза дослідження полягає в тому, що шляхом оптимізації окремих етапів у циклі підготовки (дозуванні, деструкції-кавітації, підігріву) різних видів ЕК та спеціальних домішок (ензимів) досягається збільшення виходу біогазу та органічних добрив, підвищується їх якість, збільшується продуктивність БГУ та зменшується собівартість біогазу.

Технологію виробництва біогазу та органічних біодобрив можна представити у багатокроковій послідовності окремих стадій і робочих операцій. У БГУ охоплюється весь цикл операцій – від прийому оптимальних об'ємів різного виду вхідної сировини та спеціальних домішок і до одержання готової продукції – біогазу та добрив. При цьому передбачається, що процес переробки вхідної сировини являє собою керований  $N$ -етапний динамічний процес, який на кожному ( $n$ -му) етапі характеризується двома видами параметрів: параметрами керування  $m_n$  (об'ємом різного виду вхідної сировини та домішок) і параметрами стану  $G_n(m_n)$  (об'ємом отриманого біогазу на  $n$ -му етапі) [5]. У вигляді обмежень виступає сумарний ресурс часу функціонування БГУ ( $T$ ) та вартісні витрати ( $C$ ), що виділяються на вхідну сировину та домішки.



**Рис. 3. Відгук біосенсора на основі ППР на присутність окремих компонент у вимірювальній комірці:**

1 – дистильована вода, 2 – антитіла, що специфічні до окремих типів мікробних клітин, 3 – бичачий сироватковий альбумін, 4, 5 – самі мікробні клітини відповідно в концентрації  $10^2$  та  $10^4$  в мл (абсциса – час аналізу, ордината – зміни резонансного кута)



**Рис. 4. Біосенсорна діаграма кількісного аналізу бактерій в біореакторній системі за допомогою імунного біосенсора на основі ППР:**

абсциса – час аналізу, с; ордината – зміни резонансного кута 1-5 -  $10^2$ - $10^6$  клітин/мл

Кінцевою метою функціонування БГУ ( $W_N$ ) є отримання максимальних об'ємів біогазу.

Загалом задача оптимального дозування різних видів вхідної сировини та домішок може бути подана так.

Знайти

$$\max W_N = \sum_{n=1}^N G_n(m_n) \quad (1)$$

при  $T_N \leq T; C_N \leq C, \quad (2)$

де  $T_N$  – використаний час упродовж  $N$  етапів функціонування БГУ;

$C_N$  – витрати впродовж  $N$  етапів функціонування БГУ.

Таким чином, необхідно знайти такі об'єми різних видів вхідної сировини та домішок на кожному етапі ( $m_n$ ), щоб максимізувати цільову функцію (1) за наступних обмежень:

$$\left. \begin{array}{l} a) \quad m_n = 0, 1, 2, \dots, \\ б) \quad \sum_{n=1}^N t_n m_n \leq T, \\ в) \quad \sum_{n=1}^N c_n m_n \leq C, \end{array} \right\} \quad (3)$$

де  $t_n$  – час анаеробного бродіння на  $n$ -му етапі функціонування БГУ;

$c_n$  – вартісні витрати вхідної сировини (домішок), що завантажується на  $n$ -му етапі.

Для знаходження оптимальних значень ( $m_n$ ) скористаємося методом динамічного програмування [4].

Оскільки в задачі є два види ресурсів ( $T$  та  $C$ ), необхідно ввести два параметри становищ  $\xi_T$  та  $\xi_C$ .

Позначимо

$$\max_{m_1, \dots, m_k} \sum_{n=1}^k G_n(m_n)$$

за умови

$$\sum_{n=1}^k t_n m_n \leq \xi_T; \quad \sum_{n=1}^k c_n m_n \leq \xi_C; \quad m_n \geq 0, \quad n = 1, \dots, k.$$

через  $A_k(\xi_T; \xi_C)$ .

Після нескладних перетворень приходимо до наступного основного рекурентного співвідношення динамічного програмування:

$$A_k(\xi_T, \xi_C) = \max_{0 \leq m_k \leq \delta_k} [G_k(m_k) + A_{k-1}(\xi_T - t_k m_k; \xi_C - c_k m_k)],$$

$$\text{де} \quad \delta_k = \min \left\{ \left[ \frac{\xi_T}{t_k} \right]; \left[ \frac{\xi_C}{c_k} \right] \right\}.$$

Одночасно з  $A_k(\xi_T; \xi_C)$  знаходимо й оптимальне рішення  $m_k^o(\xi_T; \xi_C)$ .

На  $N$ -му етапі визначаємо  $A_N(T; C)$  та одночасно –  $m_N^o(T; C)$ .

Найбільш вагомою перешкодою у вирішенні цієї задачі є велика її розмірність. Тому, з метою зниження розмірності, від задачі (1) перейдемо до задачі з одним обмеженням

$$\max W_1 = \max_{\{m_n\}} \sum_{n=1}^N G_n(m_n) - \lambda \sum_{n=1}^N c_n m_n \quad (4)$$

за умови

$$\sum_{n=1}^N t_n m_n = T; \quad m_n \geq 0$$

де  $\lambda$  – множник Лагранжа [4].

Використання методу невизначених множників Лагранжа дає змогу зменшити розмірність, і тому задача (4) незрівнянно простіша за початкову.

Апріорі величина  $\lambda$  невідома, і тому задачу (4) доводиться вирішувати при декількох довільних значеннях  $\lambda$ . Оптимальне рішення задачі (4) буде залежати від  $\lambda$ :

$$m_{n\text{opt}} = m_n^o(\lambda) \quad (n = 1, \dots, N).$$

Якщо знайдене рішення  $m_n^o(\lambda)$  відповідає обмеженню (3в), то воно є шуканим рішенням задачі (1). В іншому випадку, значення  $\lambda$  треба корегувати. Зокрема, якщо з'ясується, що  $\sum_{n=1}^N c_n m_n^o(\lambda) > C$ , то необхідно збільшувати  $\lambda$ .

Для швидкого визначення  $\lambda$  може бути застосований метод послідовних наближень [5]. Якщо для значень  $\lambda_1, \lambda_2$  знайдені оптимальні рішення  $m_1^o(\lambda_1), m_2^o(\lambda_2)$ , то на наступному кроці отримуємо  $\lambda_3$  з формули

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{h_2 - h_1} (C - h_1) + \lambda_1,$$

де

$$h_2 = \sum_{n=1}^N c_n m_n^o(\lambda_2); \quad h_1 = \sum_{n=1}^N c_n m_n^o(\lambda_1).$$

Оскільки у задачі (4) розглядається один вид ресурсу (C), необхідно ввести один параметр становища  $\xi_C$ .

Позначимо

$$\max_{m_1, \dots, m_k} \sum_{n=1}^k G_n(m_n)$$

за умови

$$\sum_{n=1}^k t_n m_n \leq \xi_T; \quad m_n \geq 0, \quad n = 1, \dots, k.$$

через  $A_k(\xi_c)$ .

Тоді основне рекурентне співвідношення динамічного програмування має наступний вигляд:

$$A_k(\xi_c) = \max_{m_k} [G_k(m_k) - \lambda c_k m_k + A_{k-1}(\xi_c - c_k m_k)]$$

Необхідно відзначити, що метод динамічного програмування являє собою направлений послідовний перебір варіантів, що обов'язково приводить до глобального максимуму й оптимального вирішення задачі (1).

На основі запропонованого методу відпрацьовуються стратегії оптимального керування ЕТК БГУ. Залежно від наявності технічних засобів і прогнозованих умов  $u^p \in U$  генерується множина стратегій  $\{V\}$ . Серед існуючої множини стратегій визначається така  $v^p \in V$ , при якій забезпечується отримання максимального прибутку (P) від реалізації біометану та добрив:

$$P(v^p) = D - (C + kT) \rightarrow \max, \quad (5)$$

при  $u^p \in U$ ,

де  $D$  – відповідно прогнозований дохід від реалізації біометану та добрив, грн;  
 $C$  – вартість реалізації  $v^p$ -ої стратегії керування ЕТК щодо переробки різних видів вхідної біомаси та спеціальних домішок для отримання біометану, грн;

$k$  – вартість функціонування одного часу БГУ, грн/час;

$T$  – час роботи БГУ при реалізації  $v^p$ -ої стратегії керування ЕТК.

Таким чином, в умовах динамічних змін багатьох зовнішніх та внутрішніх факторів, що характеризуються постійною невизначеністю, основою успішного функціонування БГУ є визначення оптимальних стратегій керування ЕТК БГУ для отримання максимальних об'ємів біометану та органічних добрив.

### Висновки

На основі проведеного аналізу задач керування ЕТК, що впливають на ефективність виробництва біометану, розроблено метод та систему оптимального керування електротехнічним комплексом біогазової установки щодо дозування вхідних субстратів та необхідних каталітичних домішок для отримання максимальних об'ємів біогазу та органічних добрив.

### Список літератури

1. Гелетука Г. Г. Перспективи біогазу в Україні. – Економічна правда, 2013. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.epravda.com.ua/columns/2013/07/3/383399/>.
2. Гелетука Г. Г. Развитие биогазовых технологий в Украине и Германии: нормативно-правовое поле, состояние и перспектива / Г. Г. Гелетука, П. Кучерук, Ю. Б. Матвеев. – Киев-Гюльцов, 2013. – 71 с.
3. Starodub, N. (2016). Efficiency of Instrumental Analytical Approaches at the Control of Bacterial Infections in Water, Foods and Feed / N. Starodub, J. Ogorodniichuk, O. Novgorodova // Biosensors for Security and Bioterrorism Applications, Edited by Dimitrios P. Nikolelis, 199.
4. Шворов С. А. Метод оптимального дозування вхідних субстратів та спеціальних домішок для біогазових установок / С. А. Шворов, О. М. Юрченко, Д. С. Комарчук, П. Г. Охріменко // Відновлювальна енергетика. – 2015. – № 2. – С. 80–83.
5. Ogorodniichuk, J. (2013). Optical Immune Biosensors for Salmonella Typhimurium Detection // J. Ogorodniichuk, N. Starodub, T. Lebedeva, P. Shpylovyu // Advances in Biosensors and Bioelectronics (ABB), 2, 3, 39–46.

### References

1. Heletukha, H. (2013). Perspektyvy biogazu v Ukrayini [Prospects for biogas production in Ukraine]. Ekonomichna pravda. – Available at: <http://www.epravda.com.ua/columns/2013/07/3/383399/>.
2. Heletukha, H., Kucheruk, P. Matveev, Y. (2013). Razvitiye byogazovykh tekhnologyu v Ukrayne y Germanyyi: normativno-pravovoye pole, sostoyanye y perspektyva [The development of biogas technology in Ukraine and Germany: the regulatory and legal framework, and the prospect of a state]. Kiev-Gültz, 71.



3. Starodub, N., Ogorodniichuk, J., Novgorodova, O. (2016). Efficiency of Instrumental Analytical Approaches at the Control of Bacterial Infections in Water, Foods and Feed . Biosensors for Security and Bioterrorism Applications, 199.

4. Shvorov, S. A. Yurchenko, O. M., Komarchuk, D. S., Okhrimenko, P. H. (2015). Metod optimal'nogo dozuvannya vkhidnykh substrativ ta spetsial'nykh domishok dlya biogazovykh ustanovok [The method of optimal dosing incoming substrates and special additives for biogas]. Renewable energy, 2, 80–83.

5. Ogorodniichuk, J. N., Starodub, T., Lebedeva, T., Shpylovyy P. (2013). Optical Immune Biosensors for Salmonella Typhimurium Detection. Advances in Biosensors and Bioelectronics (ABB), 2 (3), 39–46.

## **СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ**

**Н. Ф. Стародуб,  
С. А. Шворов,  
Д. С. Комарчук,  
В. Е. Лукин,  
П. Г. Охрименко**

***Аннотация.** Предложена функциональная структура системы оптимального управления электротехническим комплексом биогазовой установки, обеспечивающей получение максимальных объемов биогаза и органических удобрений на основе переработки различных видов субстратов и использования специальных добавок. Рассмотрены основные задачи по оптимальной дозировке и преобразованию в биогаз различных видов энергетических культур и других органических отходов.*

***Ключевые слова:** оптимальная система управления, электротехнический комплекс, биогазовая установка, органическое сырье, биогаз, энергетические культуры, биометан*

## **SYSTEM CONTROL OF THE ELECTROTECHNICAL COMPLEX OF BIOGAS PRODUCTION**

**N. Starodub,  
S. Shvorow,  
D. Komarchuk,  
V. Lukin,  
P. Ohrimenko**

***Abstract.** The functional structure for the optimization of the system control of the electro technical complex of biogas production providing maximal it volumes and obtaining organic fertilizer based on processing of different types of substances and using of special additives is analyzed. It is discussed the main task of the optimal dosage and transformation into biogas of different types of energy crops and other organic wastes.*

***Keywords:** biogas production, biomethane, organic feed, energy crops, electro technical complex, control system*