

## АНОТАЦІЯ

*Максимов М. М.* Підвищення енергетичної ефективності біогазової технології за рахунок пошуку комп'ютерно-інтегрованою системою управління найкращої структури її енергоустановок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Одеський національний політехнічний університет МОН України, Одеса, 2020.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню методів і моделей автоматизованого управління енергетичною установкою, яка використовує відновлювальні джерела енергії для підтримання балансу енергетичної системи. Це стає можливим завдяки пошуку найкращої структури складових частин установки із підвищенням їхньої енергетичної ефективності і переміщенням такої установки в клас регульованих.

У першому розділі «Дослідження питання про можливість регулювання єдиної енергетичної системи за допомогою поновлюваних джерел енергії»:

– проведено аналіз можливості регулювання енергосистеми установками будь-якого типу. Показано, що існує гранична кількість енергетичних установок, які не диспетчеризуються. Ці установки використовують поновлювані джерела енергії, тож перевищення їхньої кількості істотно зменшує властивості регулювання енергосистеми і, як наслідок, її ефективність. Процеси автоматизації установок, що не диспетчеризуються, не відповідають стандартним прийомам. А в разі експлуатації спільно з установкою, яка акумулює, виникає нерозв'язна пріоритетність вирішення таких завдань: або регулювати акумулятор, що заряджається, або підтримувати баланс споживання енергосистеми,

беручи до уваги той факт, що керуюча система має лише прогнозну або статистичну інформацію про майбутні зовнішні збурення.

Гострота і важливість вирішення такого завдання визначається тим, що сьогодні відсутнє його розв'язання на науковому рівні, а на інженерному воно вирішується інтуїтивно. При цьому практично відсутні моделі та методи, які надають можливість пошуку комп'ютерно-інтегрованою системою управління найкращої структури енергоустановок для забезпечення балансу енергетичної системи;

- розроблено метод експрес-аналізу, що визначає придатність енергетичних установок різних видів для компенсації збурень в енергетичній системі, залежно від їхніх динамічних характеристик;

- показано перспективність використання біотенкових технологій як особливого класу енергетичних установок з поновлюваними джерелами енергії за модернізації КІСУ, яка дозволить використовувати не лише біометан, а й інші продукти біотехнологічного походження в енергетиці;

- обґрунтовано структуру і сформульовано завдання дисертаційного дослідження, яке полягає у розробці методів і моделей автоматизованого управління енергетичною установкою, що використовує відновлювальні джерела енергії, для підтримки балансу енергетичної системи. Цей баланс здійснюється за рахунок пошуку найкращої структури складових частин установки, що підвищує її енергетичну ефективність і допомагає набутти властивість керованості.

У другому розділі «Імітаційна модель біогазової установки як об'єкта керування» одержано такі результати:

- розроблено метод моделювання складу та перетворення речовин біогазової технології з поновлюваними джерелами енергії, а саме збродженого залишку та синтез-газу, модельним уявленням умовною формулою. Цей метод використовує закони хімічної кінетики, збереження речовини і балансу максимальних валентностей окислювальних і

відновних елементів, що дало змогу розрахувати граничну теплотворну здатність сумішей органічних речовин;

– розроблено математичну модель для аналізу ефективності процесу піролізу збродженого залишку з біогазових установок у печі, що доповнило газову складову, а у схему біотехнологічної установки додано регульований об'єкт управління у вигляді печі піролізу;

– під час вирішення реальних технологічних задач додатково було знайдено можливість одержання деякої кількості вуглистого залишку та смоли за проведення піролізу збродженого залишку.

В третьому розділі «Автоматизована система регулювання процесом переробки органічної сировини на базі моделі ідентифікації складу продуктів повільного піролізу» виконано таке:

– під час досліджень знайдено можливість розробки імітаційної моделі процесу піролізу, що дає змогу отримати склад продукт-газу з максимальною теплотворною здатністю за мінімальної кількості вуглистого залишку залежно від складу вихідної сировини;

– знайдено вирішення проблеми компенсації збурення в автоматизованій системі управління за хімічним складом збродженого залишку на основі моделі визначення складу пального за рахунок використання надлишкових вимірювань витрати палива, повітря і температури полум'я в ізоентальпійному пристрої, що дає змогу знайти стійке рішення для співвідношення зброджений залишок – повітря для печі піролізу;

– запропоновано автоматизовану систему управління установкою повільного піролізу для одержання продукт-газу. Метод управління повільного піролізу збродженого залишку забезпечує задані витрати продукт-газу в разі нанесення збурення складом вихідної сировини.

В четвертому розділі «Метод пошуку найкращого рішення для керування структурою біоенергетичної установки» досягнута мета дисертаційної роботи, а саме:

- запропоновано цільову функцію, яка враховує ефективність експлуатації різних структурних комбінацій енергетичними установками, що працюють у системі, з метою створення структури технічних засобів, яким притаманна властивість регулювання;

- розроблено метод пошуку найкращої структури енергетичних установок, що визначає придатність енергетичних установок різних видів, залежно від їхніх динамічних характеристик, для можливості компенсації збурень;

- пошук максимуму цільової функції наведено в режимі реального часу роботи КІСУ під час перехідних процесів. Після нанесення збурень розраховуються можливі конфігурації енергетичної установки або її складових, яким притаманна властивість регулювання для забезпечення балансу між виробництвом і споживанням електричної енергії. КІСК об'єднує в собі розрахунки ефективності кожної установки або її складових і загальну системну потребу або завдання на виробництво. Для приведення різних варіантів розрахунків до рівного ефекту використовується критерій замикаючих витрат енергії, що дозволяє звести задачу до одного аргументу (часу), і знаходити максимальне значення функції за будь-яких зовнішніх збурень;

- показано перевагу розробленого методу пошуку найкращого рішення порівняно з відомими.

**Ключові слова:** АСУ, джерела відновлювальної енергії; ідентифікація збродженого залишку, продукт-газ, баланс енергосистеми, КІСК, керування зміною структури, цільова функція, піроліз, біотенкова технологія, замикаючі витрати енергії.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації*

1. Лысюк А. В. Модель и метод сжигания в теплоэнергетической установке углеводородного газа переменного состава / А. В. Лысюк, А. В. Бондаренко, **М. М. Максимов**, А. И. Брунеткин // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. 2017. Т. 9, No 2 С. 21–27. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI), РИНЦ). Режим доступу: <https://journals.onaft.edu.ua/index.php/atbp/article/view/558>.

2. Maksymova O. Development of the method of determining the target function of optimization of power plant / О. Maksymova, **М. Maksymov**, V. Silina, A. Orischenko // Автоматизация технологических и бизнес-процесів. 2017. Volume 9, Issue 2. P. 28–35. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI), РИНЦ). Режим доступу: <https://journals.onaft.edu.ua/index.php/atbp/article/view/559>.

3. Maksymova O. Analysis of the energy system balance efficiency provided with the different groups of generating plants / О. Maksymova, **М. Maksymov**, V. Silina, A. Orischenko // Автоматизация технологических и бизнес-процесів. 2017. Volume 9, Issue 4. P. 5–17. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI), РИНЦ). Режим доступу: <https://journals.onaft.edu.ua/index.php/atbp/article/view/814>.

4. **Maksimov M.** Increasing of process efficiency of biogas plants production processing / **М. Maksimov**, V. Davydov, G. Krusir, O. Maksimova // Праці Одеського політехнічного університету. 2017. Iss. 3. P. 43–53. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI)). Режим доступу: <http://pratsi.opu.ua/articles/show/11997>.

5. Brunetkin O. Development of a model of processes for the thermal processing of organic matters of variable composition / **М. Maksymov**, О.

Brunetkin // Праці Одеського політехнічного університету. 2019. Iss. 2. P. 21–32. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI)). Режим доступу: <http://pratsi.opu.ua/articles/show/18436>.

6. **Максимов М. М.** Моделирование балансировки энергосистемы при условии содержания в ней значительной доли недиспетчеризуемых источников энергии / **М. М. Максимов**, В. О. Давидов // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. 2019. Volume 11, Issue 4. P. 27–34. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI), РИНЦ). Режим доступу: <https://journals.onaft.edu.ua/index.php/atbp/article/view/1596>.

7. Brunetkin O. Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis / O. Brunetkin, M. V. Maksymov, A. Maksymenko, **М. М. Maksymov** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. 4/6 (100). P. 25–31. (Журнал включено до НМБД SCOPUS, Index Copernicus, CrossRef (DOI)). Режим доступу: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/176422>.

8. **Maksymov M. M.** The method of finding the most natural structure of a biotank power plant / **М. М. Maksymov**, K. V. Beglov, O. B. Maksymova, O. M. Maksymov // Праці Одеського політехнічного університету. 2020. Iss. 1(60). – P. 82–95. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI)). Режим доступу: DOI: 10.15276/opu.1.60.2020.09

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

9. **Максимов М. М.** Повышение эффективности утилизации продуктов биогазовых установок / **М. М. Максимов**, В. О. Давыдов // «Автоматика 2018» : XXV Міжнар. конф. по автоматичн. управл., 18–19 вересня 2018 р., м. Львів. – С. 41–42. <http://science.lpnu.ua/avtomatika-2018>.

10. **Максимов М. М.** Решение проблемы утилизации сброженного остатка биогазовых установок / **М. М. Максимов**, В. О. Давыдов // «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»: IX Міжнар. наук.-практ. конф., 14–16 травня 2019 р., м. Чернігів. Т. 2. С. 161. <http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/18207>.

11. Бутенко А. В. Разработка метода определения целевой функции оптимизации энергетической установки / А. В. Бутенко, В. Е. Демиденко, **М. М. Максимов**, О. Б. Максимова // Modern scientific challenges and trends: IX International Scientific Conference, 20th October, 2018, Warsaw, Poland. Issue 9. P. 152–156. Режим доступа: [https://sciencecentrum.pl/wpcontent/uploads/2019/03/modern\\_scientific\\_challenges%20%28web%29.pdf](https://sciencecentrum.pl/wpcontent/uploads/2019/03/modern_scientific_challenges%20%28web%29.pdf).

12. Бутенко А. В. Анализ эффективности энергетической системы, обеспечиваемый различными видами энергогенерирующих установок / А. В. Бутенко, В. Е. Демиденко, **М. М. Максимов**, О. Б. Максимова // Science and technology of the present time: priority development directions of Ukraine and Poland: International Multidisciplinary Conference, 19–20 October, 2018, Wolomin, Republic of Poland, Volume 4. P. 90–93.

## **ABSTRACT**

*Maksymov M. M.* Improving the energy efficiency of biogas technology via searching for the best structure of its power plants by computer-integrated control system. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for Philosophy Doctor degree by specialty 151 – Automation and computer- integrated technologies. Odesa National Polytechnic University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2020.

The dissertation is devoted to solving the actual scientific and technical task of modernizing the automated control system of a steam boiler by

identifying the variable composition of the oxygen-containing hydrocarbon fuel during operation at all levels of power.

The dissertation is devoted for methods and models improvement of automated control of the power plant, which uses renewable energy sources to maintain the balance of the energy system. This become possible by searching the best structure for the components of the plant while increasing its energy efficiency and moving such plant into regulated class.

In the first section "Status of the issue about possibility of regulating the energy system using renewable energy sources" had been done the following:

- there had been done an analysis of energy system regulation possibility by any type of plant. It is shown that there is a limit number of non-dispatchable power plants. These plants use renewable energy sources and exceeding its amount is reducing their power control properties and, consequently, its efficiency. The processes of automation of non-dispatching plants do not match standard techniques. And in case of operation together with the plant, which accumulates, there is an insolvable priority to manage the following problems. Either adjusting the rechargeable battery or maintain the power consumption balance, taking into account the fact that the control system has only predictive or statistical information about future external disturbances. The severity and importance of solving this problem is determined by the fact that for the time being solution is absent at the scientific level, and at the engineering level- it is solved only intuitively. At the same time there are almost no models and methods that will make it possible to find a computer-integrated control system for the best structure of power plants to ensure the balance of the energy system.

- developed method of express-analysis, which determines the suitability of power plants of different types for the possibility of compensation for disturbances in the energy system, depending on their dynamic characteristics;

- it is shown the prospect of using biotank technologies as a special class of renewable energy power plants in the case of modernization of CISU, which



will allow to use not only biomethane but also another biotechnological products in power engineering;

- the structure is substantiated and the thesis of the dissertation is formulated, which consists in the development of methods and models of automated control of the power plant, which uses renewable energy sources to maintain the balance of the energy system. This balance is achieved by finding the best structure of the components of the installation, which increases its energy efficiency and makes it possible to acquire controllability.

In the second section "Simulation model of biogas plant as an object of control" the following results had been obtained:

- a method of modelling the composition and transformation of substances of biogas technology with renewable energy sources, namely fermented residue and synthesis-gas by model representation formula. This method uses the laws of chemical kinetics, preservation of matter and the balance of maximum valences of oxidizing and renewing elements, which made it possible to calculate the value limitation of mixtures of organic substances;

- a mathematical model was developed to analyse the efficiency of the pyrolysis process of the fermented residue from the biogas plants in the furnace, which supplemented the gas component, and in regulated control form object of a pyrolysis furnace to the scheme of the biotechnological plant was added;

- when solving real technological problems, it was additionally obtained possibility of getting some amount of carbon residue and resin during pyrolysis of the fermented residue.

In the third section "ACP process of organic raw materials processing based on the model of identification of the slow pyrolysis products composition" the following had been done:

- during the researches the possibility of developing a simulation model of the pyrolysis process was found, which allows to obtain the product-gas

composition with the maximum calorific value at the minimum amount of carbon residue, depending on the composition of the raw material;

- the solution of the problem of compensation of perturbation in the automated control system for the chemical composition of the fermented residue is found on the basis of the model of determination of the fuel composition by using excess measurements of fuel consumption, air and the flame temperature in the isoenthalpic device, which allows to find a stable solution for the ratio of the fermented residue - air of pyrolysis furnace;

- an automated control system of slow pyrolysis plant for product gas production is proposed. The method of controlling the slow pyrolysis of the fermented residue provides a predetermined cost of product-gas in the case of perturbation of the composition of the raw material.

In the fourth section "The method of searching the best solution for control the structure of the bioenergy plant" the goal of the dissertation was achieved, namely:

- a purpose function is advised, which takes into account the efficiency of operation of various structural combinations with power units operating in the system with the purpose of creating a structure of technical means, which has a property of regulation;

- the method of searching the best structure of power plants was developed, which determines the suitability of power plants of different types depending on their dynamic characteristics, in order to compensate the disturbances;

- searching the maximum of the objective function is given in real-time work of CISU during transients. After the disturbance is applied, the possible configurations of the power plant or its component are calculated, which have the property of regulation to ensure a balance between the production and consumption of electricity. KISU combines the calculations of the efficiency of each plant or its components and the overall system requirement or production

task. To bring different variants of calculations to equal effect, the criterion of trailing energy costs is used, which allows to solve the issue to one argument (time) and to find the maximum value of the function if any external perturbations;

– it is shown the advantage of the developed method of finding the best solution compare with known ones.

Keywords: ACS, renewable energy sources, identification of fermented residue, product-gas, balance of energy system, CISU, structure changing control, target function, pyrolysis, biotank technology, trailing energy costs.

## LIST OF PUBLICATIONS

*Publications where the main scientific results of the dissertation are published*

1. Lysyuk A. V. Model and method of combustion in a thermal power plant with variable composition of hydrocarbon gas / A. V. Lysyuk, A. V. Bondarenko, **M. M. Maksymov**, A. I. Brunetkin // Automation of technological and business processes. 2017. T. 9, No. 2. P. 21–27. (Magazine included in NMBD Index Copernicus, CrossRef (DOI), RINC). <https://journals.onaft.edu.ua/index.php/atbp/article/view/558> (in Russian).

2. Maksymova O. Development of the method of determining the target function of power plant optimization / O. Maksymova, **M. Maksymov**, V. Silina, A. Orischenko // Automation of technological and business processes. 2017. Volume 9, Issue 2. Pp. 28–35. (Journal included in the NMBD Index Copernicus, CrossRef (DOI), RINC). <https://journals.onaft.edu.ua/index.php/atbp/article/view/559>.

3. Maksymova O. Analysis of the energy system balance efficiency provided with different groups of generating plants / O. Maksymova, **M.**

**Maksymov, V. Silina, A. Orischenko** // Automation of technological and business processes. 2017. Volume 9, Issue 4. P. 5–17. (Journal included in the NMBD Index Copernicus, CrossRef (DOI), RINC). <https://journals.onaft.edu.ua/index.php/atbp/article/view/814>.

4. **Maksymov M.** Increasing the process efficiency of biogas plants production processing / **M. Maksymov, V. Davydov, G. Krusir, O. Maksymova** // Proceedings of the Odessa Polytechnic University. 2017. Iss. 3. P. 43–53. (Magazine included in the NMBD Index Copernicus, CrossRef (DOI)). <http://pratsi.opu.ua/articles/show/11997>.

5. **Brunetkin O.** Development of a model of processes for the thermal processing of organic matters of variable composition / **M. Maksymov, O. Brunetkin** // Proceedings of the Odesa Polytechnic University. 2019. Iss. 2. P. 21–32. (Magazine included in the NMBD Index Copernicus, CrossRef (DOI)). <http://pratsi.opu.ua/articles/show/18436>.

6. **Maksymov M. M.** Simulation of power system balancing under the condition that it contains a significant proportion of non-dispatchable energy sources / **M. M. Maksymov, V. O. Davidov** // Automation of technological and business processes. 2019. Volume 11, Issue 4. P. 27–34. (Magazine included in NMBD Index Copernicus, CrossRef (DOI), RINC). <https://journals.onaft.edu.ua/index.php/atbp/article/view/1596> (in Russian).

7. **Brunetkin O.** Development of the unified model for the identification of the composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis / **O. Brunetkin, M. V. Maksymov, A. Maksymenko, M. M. Maksymov** // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2019. 4/6 (100). P. 25–31. (Magazine included in SCOPUS NMBD, Copernicus Index, CrossRef (DOI)). <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/176422>.

8. **Maksymov M. M.** The method of finding the most natural structure of a biotank power plant / **M. M. Maksymov, K. V. Beglov,**

O. B. Maksymova, O. M. Maksymov // Proceedings of the Odesa Polytechnic University. 2020. Iss. 1(60). P. 82–95. (Magazine included in the NMBD Index Copernicus, CrossRef (DOI)). DOI: 10.15276/opu.1.60.2020.09

*Published works of approbatory character*

9. Maksymov M. M. Improving the utilization efficiency of biogas plants products / **M.M. Maksymov**, V.O. Davydov // “Automation 2018” : XXV International Conf. by automatic. Management, September 18–19, 2018, Lviv. Pp. 41–42. <http://science.lpnu.ua/automatika-2018> (in Russian).

10. Maksymov M. M. The solution of the problem of utilization of biogas plants fermented residue / **M. M. Maksymov**, V. O. Davydov // “Complex quality assurance of technological processes and systems”: IX International Scientific and Practical Conference, May 14–16, 2019, Chernihiv. P. 161. <http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/18207> (in Russian).

11. Butenko A. V. Development of a method for determining the objective function of optimization of the power plant / A. V. Butenko, V. E. Demidenko, **M. M. Maksymov**, O. B. Maksymova // Modern scientific challenges and trends: IX International Scientific Conference, 20th October, 2018, Warsaw, Poland. Issue. 9. P. 152–156. [https://sciencecentrum.pl/wpcontent/uploads/2019/03/MODERN\\_SCIENTIFIC\\_CHALLENGES % 20 % 28web % 29.pdf](https://sciencecentrum.pl/wpcontent/uploads/2019/03/MODERN_SCIENTIFIC_CHALLENGES % 20 % 28web % 29.pdf) (in Russian).

12. Butenko A. V. Analysis of the efficiency of the energy system supplied by different types of energy generating plants / A. V. Butenko, V. E. Demidenko, **M. M. Maksymov**, O. B. Maksymova // Science and technology of the present time: priority development directions of Ukraine and Poland: International Multidisciplinary Conference, 19–20 October, 2018, Wolomin, Republic of Poland, Volume 4. P. 90–93 (in Russian).