

**Концур В.О.**

Одеський національний політехнічний університет

**Беглов К.В.**

Одеський національний політехнічний університет

## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ГРУПИ КОТЛІВ ПІД ЧАС СПАЛЮВАННЯ НЕСЕРТИФІКОВАНОГО ПАЛИВА

Використання біогазу є одним із перспективних напрямів розвитку енергетики України, але заміна природного газу на біогаз викликає низку проблем під час експлуатації теплогенеруючого обладнання. Основною проблемою є коливання складу газу, що йде на горіння. Через різний склад газу відбуваються значні коливання витрат повітря та, як наслідок, змінюються властивості газоповітряного тракту й теплообмінних процесів.

Дослідження зі спалювання біопалива в котельних установках проводяться досить давно. Уже створено й експлуатується багато котельних установок, які використовують як основне паливо біогаз чи рідке біопаливо. Проте ті котли, що експлуатуються, уже розраховані на спалювання біогазу, причому вважається, що склад палива не змінюється.

Від сучасних АСУ ТП необхідна надійна адаптація до зміни середовища їх використання за відсутності або мінімального втручання оператора під час їх функціонування. Сучасний рівень розвитку теорії оптимального управління й теорії адаптивних систем АСУ дає змогу вирішити нове завдання управління технічними структурами не лише за параметрами, а й за структурою взаємозамінного устаткування системи, яке відрізняється своєю надійністю, ефективністю й вартістю.

У статті розглянуто автоматизовану систему управління потужністю групи котлів. Використано математичну модель спалювання несертифікованого газоподібного палива, у якій урахується нелінійна залежність між кількістю тепла, що подається до топкового пристрою, і кількістю тепла, що сприймається теплоносієм, залежно від умов теплопередачі, спричинених значними коливаннями витрати димових газів.

Ця нелінійна модель далі використовується для визначення найкращого способу навантаження кожного котла з групи, що працюють на загального споживача, який забезпечує найбільше значення сумарного ККД котельні, а також для дослідження зміни експлуатаційних витрат котельні під час роботи на частковій потужності кожного з агрегатів.

Для пошуку мінімуму цільової функції використано модифікований симплекс метод. Моделювання динамічних характеристик котлів реалізовано в пакеті Simulink, а пошукова процедура реалізована у вигляді script файлу мовою Matlab. Це дає змогу оцінити час пошуку під час роботи на реальному обладнанні.

**Ключові слова:** керування, група котлів, навантаження, нелінійна модель, оптимізація, симплекс метод.

**Постановка проблеми.** Сьогодні активно ведуться дослідження з використання поновлюваних джерел енергії. Зокрема, розглядаються питання використання як палива біогазу, отриманого шляхом переробки органічних відходів сільськогосподарської діяльності. Заміна природного газу на біогаз викликає низку проблем під час експлуатації теплогенеруючого обладнання. Основною такою проблемою можна вважати значні коливання складу газу, що йде на горіння. Це викликає значні коливання витрати як палива, так і повітря, як наслідок, зміну статичних і динамічних властивостей котла [1, с. 44–52].

При спробах мінімізувати експлуатаційні витрати, а саме зменшити витрату палива, під час

роботи котельні на частковому навантаженні й спалювання несертифікованого палива доводиться відмовлятися від автоматичного регулювання та здійснювати управління в ручному режимі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Класичним методом розподілу навантаження між котлами, що працюють на загального споживача, є розподіл за найменшим відносним приростом витрати палива. Через свою класичність цей метод застосовують на багатьох енергогенеруючих підприємствах (котельних, ТЕЦ, ТЕС), він модифікований для реалізації в сучасних АСУ ТП. Але знову й знову з'являються роботи, що дають змогу підвищити якість рішень з автоматизованого управління обладнанням [2; 3; 4].

Робота [2, с. 71–77] присвячена опису програмного комплексу, що дає змогу провести керування розподілом теплового та електричного навантаження між енергоблоками. Як цільова функція обрана мінімізація витрати палива загалом по електростанції. Програмний комплекс реалізується за допомогою SCADA системи на базі сучасних обчислювальних засобів.

У статті [3, с. 25–27] наведено методику визначення годинної витрати палива на основі відносних приростів витрати палива блоку. Для вирішення завдання застосовуються числові методи. Критерієм оптимальності є умова рівності відносних приростів витрати палива для котлів, що працюють на різних потужностях.

Стаття [4, с. 15–20] присвячена аналізу алгоритмів оптимального управління виробничими й технологічними процесами, що відбуваються на енергоблоках ТЕС. Одним із висновків роботи є те, що керувати економічністю технологічного процесу за допомогою пошуку мінімуму відносного приросту витрати палива некоректно. Це зумовлено інерційністю процесів у системі «котел-турбіна-генератор». Застосування цього критерію можливе тільки для суворо стаціонарних режимів роботи обладнання без будь-яких зовнішніх і внутрішніх збурень. При нестационарних процесах у тепловому обладнанні питома витрата палива може коливатися непередбачувано й не відображає поточну економічність його роботи.

Увага проблемі змінного складу палива приділяється в праці [5, с. 108–114]. У ній обґрунтовується введення комплексного критерію оцінювання роботи ТЕС. У складі критерію пропонується використання як одного з показників зміну складу палива. Але для малих котельнь запропонована оцінка якості роботи занадто складна з огляду на малі викиди та обчислювальну потужність керувальних пристроїв.

Спалюванню біопалива в котельних установках у нинішній час також приділяється багато уваги. В експлуатації знаходиться багато котельних установок, у яких як основне паливо використовують біогаз. Уже розроблені математичні моделі котлів, що враховують нелінійні властивості обладнання при глибоких збуреннях теплотворною спроможністю палива [6; 7; 8; 9; 10; 11]. Кожна із цих робіт присвячена розробленню окремого елемента математичної моделі.

Робота [6, с. 79–84] присвячена визначенню коефіцієнта теплопередачі при спалюванні газів змінного складу.

У праці [7, с. 32–36] досліджується взаємозв'язок між зміною складу палива та необхідною

площиною поверхонь теплообміну для забезпечення необхідної потужності котлоагрегату.

Ці дві роботи отримали подальший розвиток у моделях парового котла в праці [8, с. 180–185] і моделях водогрійних котлів [10, с. 132–136; 11, с. 116–121].

У роботах [9, с. 109–115; 12, с. 37–46] розглянуті загальні питання керування потужністю котельні, до складу якої входять декілька котлів.

З'ясовано, що під час оперативного управління котельним устаткуванням, а саме при збуреннях, пов'язаних зі зміною складу палива, оптимізація його роботи не відбувається. Однією з причин цього є той факт, що пошукові процедури ґрунтовані на розрахункових залежностях питомої витрати палива від навантаження котла, але в разі відхилення складу палива від розрахункового отримати вказані залежності, як показано [12], не видається можливим.

Отже, на підставі вищесказаного можна констатувати, що питання оперативного управління оптимальним розподілом навантаження між котлами, що працюють на загального споживача, з урахуванням глибоких збурень за складом палива до кінця не вирішене.

**Постановка завдання.** Мета статті – реалізувати в режимі реального часу процедуру пошуку такого розподілу навантаження між котлами, що працюють на загального споживача, що забезпечує найбільше значення сумарного ККД котельні; дослідити зміну експлуатаційних витрат котельні під час роботи на частковій потужності кожного з агрегатів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для досягнення поставленої мети використано математичну модель спалювання несертифікованого газоподібного палива шляхом урахування нелінійної зміни кількості тепла, що подається до топкового пристрою та враховує зміни умов теплопередачі при значних коливаннях витрати димових газів. Об'єктом дослідження статичних і динамічних властивостей був водогрійний водотрубний котел серії КСВа, тепла потужність якого становить 2 МВт, як один із найпоширеніших у комунальному господарстві опалювальних котельнь малої потужності. Головною відмінною рисою цих котлів є простота в експлуатації та ремонті довговічність. Котли вказаного типу можна перевести для спалювання одного виду палива на інше. Основним видом палива, відповідно до виробничої лінійки, є мазут, газ, тверде паливо.

Зазвичай з погляду управління навантаженням водогрійний котел вважається лінійним об'єктом

керування. Але при спалюванні несертифікованого палива, наприклад, біогазу, збурення за складом палива й, відповідно, за теплотворною спроможністю палива мають такі значення, що, як показано в роботі [9, с. 109–115], котел має нелінійні властивості.

У праці [10, с. 132–136] виявлено, що в разі збільшення теплотворної спроможності палива в десять разів температура води після котла зросла не в 10 разів, як це прогнозує лінійна модель, а лише в 5 разів. Тобто коефіцієнт передачі по каналу «теплотворна спроможність – температура води після котла» зменшився в 2 рази порівняно зі значенням під час роботи на базовому паливі.

На рисунку 1 наведено схему реалізації розглянутої моделі водогрійного котла.

Входами моделі є  $dQ$  – відхилення теплотворної спроможності палива,  $Q_{nom}$  – номінальне значення теплотворної спроможності палива (номінальним прийняте значення для природного газу),  $G_f$  – відхилення витрати палива,  $G_a$  – відхилення витрати повітря,  $t_{in}$  – відхилення температури води на вході в котел. Крім того, прийнято, що регулятор економичності підтримує необхідну витрату повітря  $G_a$  не залежно від витрати палива чи його складу. Вихідним параметром моделі є температура води на виході з котла.

Схему доповнено розрахунком ККД котла залежно від його потужності. Як показано в праці [12, с. 37–46], залежність ККД котла від

його навантаження може бути описана квадратичною залежністю:

$$\eta(N) = c_1(N - N_{max})^2 + c_2 \quad (1)$$

де  $c_1$  і  $c_2$  – константи.

Визначимо значення  $c_1$  і  $c_2$  виходячи з умов:  $\eta(N_{max}) = \eta_0$  – при максимальному навантаженні ККД дорівнює максимальному (розрахунковому) значенню,  $\eta(0) = 0$  – при нульовому навантаженні ККД також дорівнює нулю.

Склавши й вирішивши систему рівнянь, отримаємо значення коефіцієнтів:

$$c_1 = \frac{\eta_0}{N_{max}^2}; c_2 = \eta_0.$$

Тоді (1) можна записати у вигляді:

$$\eta(N) = \frac{\eta_0}{N_{max}^2}(N - N_{max})^2 + \eta_0 \quad (2)$$

або

$$\eta(v) = \eta_0(2v - 2v^2),$$

де  $v$  – відносна потужність.

Числові значення для математичної моделі отримані з технічних характеристик і теплового розрахунку котла.

Для визначення найкращого навантаження кожного котла пропонується використовувати цільову функцію, що враховує сумарний ККД декількох котлів, а саме вираз:

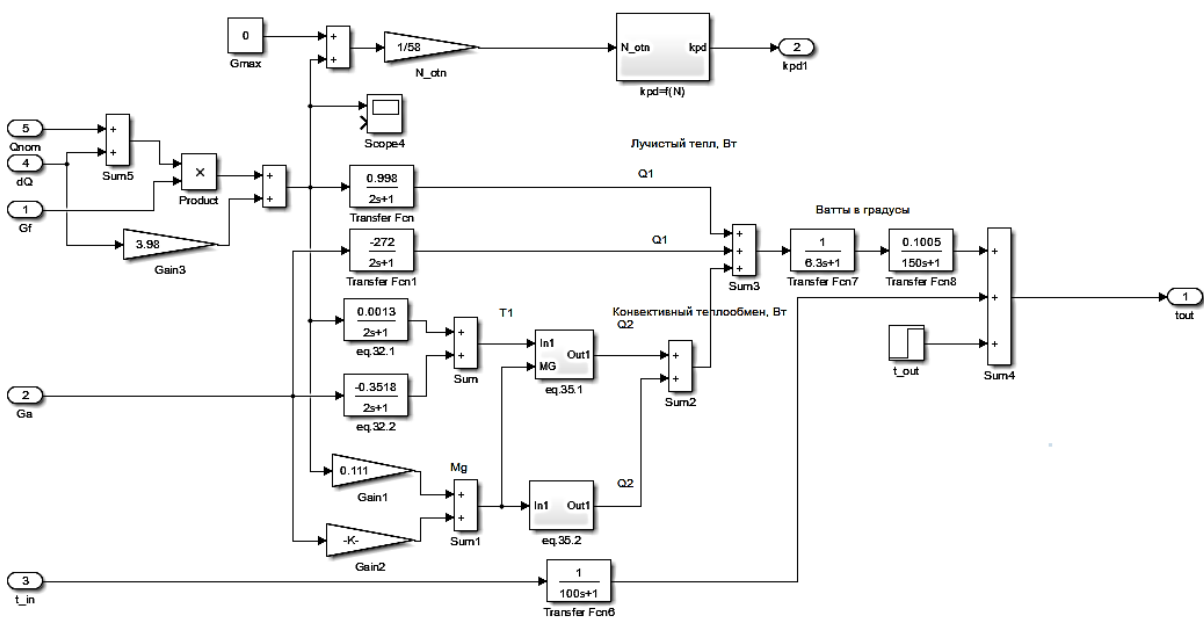


Рис. 1. Структурна схема моделювання водогрійного котла

$$I(\eta) = -\sum_{j=1}^n (a_j \eta(v_j)), \quad (3)$$

де  $n$  – кількість котлів,  $a_j$  – ваговий коефіцієнт для  $j$ -го котла.

За допомогою вагових коефіцієнтів можна надати перевагу тому чи іншому котлу, наприклад, урахувати надійність роботи. Тобто котел має більший ККД серед інших, але його не варто включати в роботу на повне навантаження через ненадійну роботу насосу чи вентилятора.

Метою роботи АСР є мінімізація функції  $I$ , а саме експлуатаційних витрат під час роботи на частковій потужності кожного з агрегатів.

Для реалізації процедури пошуку пропонується використовувати модифікований симплекс метод (Нелдера-Міда), тому що він не вимагає знаходження похідної функції, що мінімізується. Також порівняно з градієнтними методами симплекс метод вимагає меншої кількості точок розрахунку. Так, для функції двох змінних на одному кроці розрахунку градієнтним методом потрібно визначити значення функції, як мінімум, у чотирьох точках, для симплекс методу треба визначити функцію в трьох точках.

Алгоритм розрахунку оптимальних значень навантаження котлів зроблено за допомогою дже-

рела [12, с. 37–46] і реалізовано в пакеті Matlab. Причому робота обладнання з обчисленням значень  $\eta$  і  $I(\eta)$  моделювалася в пакеті Simulink, а обчислювальна пошукова процедура виконувалася шляхом виклику функції з командного рядка Matlab. Отже, враховані динамічні властивості котлів і перехідні процеси, викликані зміною завдань регуляторам.

Під час керування навантаженням водогрійного котла параметром, який регулюється, є температура води після котла. Щоб отримати значення навантаження можна, скористатися таким виразом:

$$Q = M_B \cdot c_p \cdot (t_{out} - t_{inp}), \quad (4)$$

де  $M_B$  – витрата води через котел;  $c_p$  – теплоємність теплоносія (води);  $t_{inp}$  – температура води на вході в котел;  $t_{out}$  – температура води після котла.

Отже, при постійній температурі на вході в котел навантаження пропорційно температурі, яка регулюється, й навпаки. Входом керування є витрата палива.

Схема моделювання показана на рисунку 2.

Для дослідження АСР прийняті такі початкові умови:

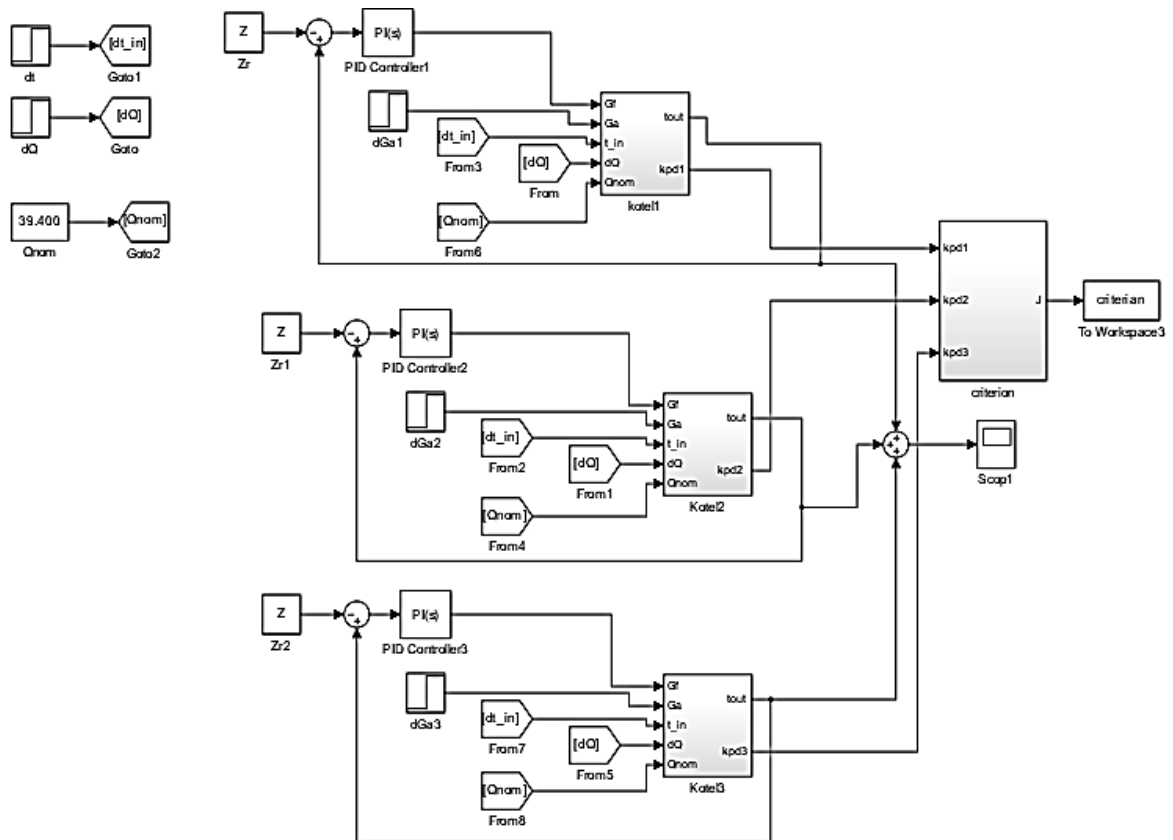


Рис. 2. Схема моделювання паралельної роботи трьох однотипних котлів

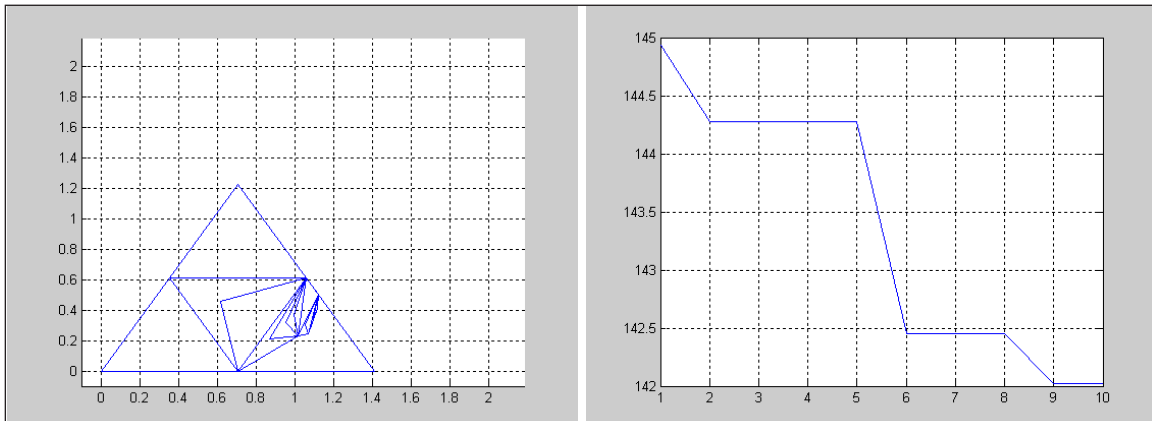


Рис. 3. Ілюстрація роботи пошукового методу:  
а) ілюстрація пошуку симплекс методом; б) зміна сумарних витрат

- температура теплоносія на вході – 60 С;
- температура теплоносія на виході не більше ніж 115 С і залежить від необхідного навантаження;
- у котельні встановлено три котла з максимальними тепловими потужностями – 1 МВт, 2 МВт, 3 МВт;
- потужність, яку необхідно підтримувати, дорівнює 55% від максимального навантаження, тобто 3,3 МВт.

З початку розрахунку для забезпечення потужності котли були навантажені так: котел № 3 як найпотужніший – на 100%, котел № 2 – на 0% (вимкнений), котел № 1 – на 30%.

Результати моделювання зведено в таблицю 1.

Таблиця 1

**Результати моделювання**

		Котел 1	Котел 2	Котел 3
	Ннач отн, %	30,0	0,0	100,0
Знач=145	Ннач абс, МВт	0,300	0,0	3,000
Зопт=142	Нопт отн, %	83,50	53,75	46,33
	Нопт абс, МВт	0,835	1,075	1.390

Ілюстрація роботи пошуку симплекс методом наведена на рисунку 3а, змінення вартості експлуатації – на рисунку 3б.

**Висновки.** У роботі розглянуто математичну модель водогрійного котла, у якому спалюється несертифіковане газоподібне паливо. З погляду регулювання потужності такий котел має нелінійні статичні й динамічні властивості.

Для поєднаної моделі з трьох котлів різної потужності застосовано метод деформованого симплексу з метою пошуку такого розподілення навантаження котлів, яке забезпечує мінімальну вартість експлуатації котельні на частковому навантаженні.

Під час розрахунків цільової функції враховувалася тривалість перехідних процесів керування, тобто можна вважати, розрахунок проводився в режимі реального часу.

Так як процедура пошуку реалізована у вигляді програми мовою Matlab, то її можна використати для програмування вільно програмованих контролерів.

**Список літератури:**

1. Mathematical model of non-certified burning fuels / M.V. Maksimov, V.F. Lozhechnikov, T.S. Dobrovolskaya, A.V. Bondarenko. *East European journal of advanced technologies*. 2014. Vol. 2. № 8 (68). P. 44–52. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/22420/21760>.
2. Програмний комплекс розподілу навантажень ТЕЦ із складним складом устаткування, схемами відпустки тепла і електроенергії / В.А. Макарч'ян, А.Н. Черняєв, А.В. Андрюшин та ін. *Теплоенергетика*. 2013. № 5. С. 71–77.
3. Реймов К.М. Визначення критерію оптимального розподілу активного навантаження між агрегатами ТЭС. *Автоматизовані технології і виробництва*. 2016. № 2 (12). С. 25–27.
4. Аракелян Е.К., Васильєв Е.Д., Хуршудян С.Р. Проблеми сучасних автоматизованих систем управління технологічним процесом на базі програмно-технічних комплексів і можливий шлях їх рішення. *Вестник МЭИ*. 2014. № 1. С. 15–20.
5. Озерова И.П., Новіков Р.С. Обґрунтування необхідності розподілу навантажень між агрегатами ТЭС на базі комплексного критерію. *Вісті Томського політехнічного університету*. 2002. Т. 305. Вип. 2 : Праці ІІ семінару ВНЗ Сибіру і Далекого Сходу з теплофізики й теплоенергетики. Томськ, 2001. С. 108–114.



6. Brunetkin O.I., Gusak A.V. Determination of the range of change of the convective heat transfer coefficient during the burning of alternative types of gaseous fuel. *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*. 2017. Vol. 2 (46). P. 79–84.
7. Brunetkin O.I., Gorban S.O. Heat transfer optimization of heat exchange surfaces of boiler equipment with decrease in consumption of combustion products. *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*. 2017. Vol. 3 (53). P. 32–36.
8. Лисюк А.В. Удосконалення АСУ барабанного котла для спалювання горючих штучних газів. *Автоматика – 2017* : матеріали XXIV Міжнародної конференції з автоматичного управління (м. Київ, Україна, 13–15 вересня 2017 р.). Київ, 2017.
9. Водогрійна котельня як об'єкт керування потужності / І.В. Вовк, І.Е. Дуба, Т.В. Конушбаєва, К.В. Беглов. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 29 (68). № 3 (1). С. 109–115.
10. Дуба І.Е., Беглов К.В. Моделювання водогрійних котлів при глибоких збуреннях за теплотворною спроможністю палива. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 29 (68). № 6 (1). С. 132–136.
11. Дуба І.Е., Беглов К.В. Моделювання водогрійних котлів при глибоких збуреннях за змістом палива. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 29 (68). № 6 (1). С. 116–121.
12. Лисюк А.В., Беглов К.В. Автоматизація розподілу навантаження між паралельно працюючими котлами. *Automation of technological and business processes* 9. 2017. № 3.

#### **Kontsur V.O., Beglov K.V. OPTIMIZATION OF BOILER GROUP OPERATING MODE DURING COMBUSTION OF NON-CERTIFIED FUEL**

*The use of biogas is one of the promising areas of energy development in Ukraine, but the replacement of natural gas with biogas causes a number of problems in the operation of heat generating equipment. The main problem is the fluctuations in the composition of the combustion gas. Due to the different composition of the gas, there are significant fluctuations in air flow and, as a consequence, the properties of the gas-air path and heat exchange processes change.*

*Research on the combustion of biofuels in boilers has been conducted for a long time. Many boiler plants have already been created and are in operation, using biogas or liquid biofuel as their main fuel. However, the boilers in operation are already designed to burn biogas, and it is believed that the fuel composition does not change.*

*Modern ACS TP requires a reliable adaptation to changes in the environment of their use, in the absence or minimal intervention of the operator in their operation. The current level of development of the theory of optimal control and the theory of adaptive systems ACS allows to solve a new problem of control of technical structures not only by parameters but also by the structure of interchangeable system equipment, which differs in its reliability, efficiency and cost.*

*The article considers the automated power control system of a group of boilers. A mathematical model of combustion of uncertified gaseous fuel is used, which takes into account the nonlinear relationship between the amount of heat supplied to the combustion device and the amount of heat perceived by the coolant depending on heat transfer conditions caused by significant fluctuations in flue gas consumption.*

*This nonlinear model is further used to determine the best way to load each boiler in the group, working on the total consumer, which provides the highest value of the total efficiency of the boiler, as well as to study changes in operating costs of the boiler at partial capacity of each unit. When calculating the objective function, the duration of transient control processes was taken into account. That is, we can assume that the calculation was performed in real time.*

*A modified simplex method was used to find the minimum of the objective function. Simulation of dynamic characteristics of boilers is implemented in the Simulink package, and the search procedure is implemented as a script file in Matlab. This allows you to estimate the search time when working on real equipment.*

**Key words:** control, group of boilers, load, nonlinear model, optimization, simplex method.