

О. М. Головченко<sup>1</sup>  
О. М. Нанака<sup>1</sup>

## КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК НА БІОПАЛИВІ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В БАЗОВОМУ ТА ВІДМІННИХ ВІД БАЗОВОГО РЕЖИМІВ НАВАНТАЖЕННЯ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Оцінено ефективність роботи когенераційних установок на біопаливі в базовому та відмінних від базового режимах роботи. Когенераційні установки з поршневыми та газотурбінними двигунами і з теплообмінниками підігріву води вихлопними газами мають ККД використання палива більше 90 %. Двигуни цих установок працюють на проблемних для України рідких та газоподібних паливах, і тому, обсяги використання біодизеля та біогазу для них збільшуються. Існуючі системи теплоенергопостачання (СТЕП) працюють як в базовому режимі так і зі змінними графіками навантаження.*

*Оцінювання ефективності здійснювалось за допомогою методу системного аналізу.*

*Розглянуто районну водогрійну котельню з постійним протягом року навантаженням гарячого водопостачання, яке складає 20 МВт. Електроенергія на власні потреби котельні береться з електромережі. В котельні пропонується встановити теплонасосну установку (ТНУ) з приводом компресора від когенераційних поршневих або газотурбінних двигунів. Метод системного аналізу показав, що застосування когенераційних двигунів в водогрійній котельні з постійним тепловим навантаженням є доцільним.*

*Також розглянуто ефективність когенераційних установок за змінних режимів роботи на прикладі СТЕП підприємства. Теплове навантаження підприємства (3 МВт) забезпечує водогрійна котельня на газовому паливі. Електроенергетичні потреби забезпечує електрична мережа. Максимальна споживана електрична потужність підприємства складає 4,3 МВт. Підприємство працює 6500 годин в рік за відносних електричних навантажень. Виконані розрахунки показали недоцільність заміни існуючої СТЕП когенераційними двигунами. Причинами цього є: додаткові експлуатаційні затрати, зменшення ККД двигунів зі зменшенням навантаження; висока вартість двигунів.*

**Ключові слова:** когенераційна установка, біопаливо, тепловий двигун, система теплоенергопостачання.

### Вступ

Когенераційні установки з поршневыми та газотурбінними двигунами і з теплообмінниками підігріву води вихлопними газами мають ККД використання палива більше 90 %. Двигуни цих установок працюють на проблемних для України рідких та газоподібних паливах, і тому, обсяги використання біодизеля та біогазу для них збільшуються. Олію для біодизеля отримують з насіння ріпаку. Її очищають та додають метиловий спирт і каталізатор (луг). Верхні фракції цієї суміші і складають біодизельне паливо. Біогаз отримують переробкою відходів сільського господарства та харчової промисловості. Існуючі системи теплоенергопостачання (СТЕП) працюють як в базовому режимі так і за змінними графіками навантажень.

*Метою роботи є дослідження ефективності СТЕП з когенераційними установками під час роботи в широкому діапазоні навантажень.*

### Основний текст

Розглянемо районну водогрійну котельню протягом року з постійним тепловим навантаженням гарячого водопостачання, яке складає 20 МВт. Електроенергія на власні потреби котельні береться з електромережі. В котельні пропонується встановити теплонасосну установку (ТНУ) з приводом компресора від когенераційних поршневих або газотурбінних двигунів. Вибираємо дизель типу

ЧМ 26/26 електричною потужністю 4400 кВт та тепловою потужністю 4160 кВт і газопоршневий двигун (ГПД) TCG 2032V16 електричною потужністю 4300 кВт та тепловою потужністю 4160 кВт [1], [2]. Також вибираємо газотурбінну установку (ГТУ) типу ГТУ33-2,5МС електричною потуж-

ністю 2350 кВт та тепловою потужністю 10920 кВт [3]. Порівняємо варіанти котельні з цими двигунами. Вважатимемо, що однаковий енергетичний ефект ці варіанти отримують за допомогою електромережі та водогрійного котла. Числові значення критерію оцінки варіантів отримані за допомогою програмної реалізації алгоритму, складеного за методом системного аналізу [4]. За цим методом функція якості (корисності) досліджуваної системи ( $F$ ) у нормованому вигляді має такий вигляд:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n k_i F_i(x_i), \quad (1)$$

де  $n$  — загальна кількість параметрів;  $F_i(x_i)$  ( $i=1 \dots n$ ) — нормовані одномірні функції корисності;  $k_i$  — вагові коефіцієнти.

Згідно з алгоритмом значення функції  $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$  отримуються в такій послідовності:

- складається математична модель системи;
- за допомогою математичної моделі визначаються значення функції  $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Математична модель системи та її програмна реалізація складаються автоматично в процесі діалогу експерта (користувача) з ЕОМ в послідовності:

- призначення критеріїв  $x_i$  та їх найгірших та найкращих рівнів;
- визначення одномірних функцій корисності  $F_i(x_i)$ ;
- визначення вагових коефіцієнтів  $k_i$ .

Визначення одномірних функцій  $F_i(x_i)$ , яке виконується експертом, здійснюється графічно, рис. 1. Для кожного з параметрів  $x$  задаються його найгірше та найкраще значення. Значенню  $x_i = x_i^{\text{найгірший}}$  відповідає, значення одномірної функції, що дорівнює нулю, а значенню  $x_i = x_i^{\text{найкращий}}$  відповідає значення, що дорівнює 1, тобто

$$F_i(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i = x_i^{\text{найгірше}}; \\ 1, & x_i = x_i^{\text{найкраще}}. \end{cases} \quad (2)$$

Третя точка на графіку визначається за допомогою лотереї 50/50. Експерт призначає такий детермінований еквівалент (ДЕ), з яким його корисність  $F_i(x_i^{\text{детерм}})$  дорівнює очікуваній:

$$F_i(x_i^{\text{детерм.}}) = 0,5 F_i(x_i^{\text{найгірше}}) + 0,5 F_i(x_i^{\text{найкраще}}) = 0,5. \quad (3)$$

Графіки апроксимуються параболічними функціями, які і є рівняннями одномірних функцій корисності.

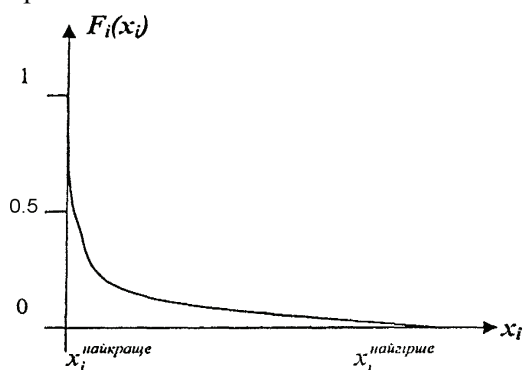


Рис. 1. Побудова одномірних функцій корисності  $F_i(x_i)$

Вагові коефіцієнти  $k_i$  оцінюються в два етапи: спочатку вони ранжуються за пріоритетністю, а потім визначаються чисельні значення вагових коефіцієнтів. Це виконується шляхом встановлення ціннісних співвідношень між критеріями. Ці співвідношення визначають можливу зміну одного критерію за рахунок іншого. Здійснюється така оцінка коефіцієнтів, як і в разі побудови одномірних функцій  $F_i(x_i)$ , за безпосередньою участю експерта.

Тепер, маючи значення коефіцієнтів  $k_i$  та знаючи вигляд одномірних функцій  $F_i(x_i)$ , можемо обчислювати і значення множинної функції  $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Критерії порівняння варіантів зведені в табл. 1. Чисельні дані критеріїв визначалися за результатами робіт [5]—[8]. Результати оцінки варіантів (чисельні значення функції корисності) наведені також в табл. 1.

Таблиця 1

## Критерії оцінки теплових двигунів, їх чисельні значення та значення функції корисності

Критерії	Дизель на дизпаливі	ГПД на природному газі	Дизель на біодизелі В20	ГПД на біогазі	ГТУ на природному газі	ГТУ на газотурбінному паливі	ГТУ на біопаливі
Капіталовкладення, млн у. о.	6,6	6,6	6,6	6,6	7,3	7,3	7,3
Затрати на паливо, млн у. о./рік	4,61	2,79	5,56	2,61	2,59	5,86	5,26
Затрати на капітальний ремонт, млн у. о.	2,64	2,64	2,64	2,64	2,92	2,92	2,92
Моторесурс, год.	240000	240000	240000	240000	100000	100000	100000
Відносний рівень негативного впливу на персонал, %	57,5	57,5	57,5	57,5	36,3	36,3	36,3
Відносна ймовірність безвідмовної роботи	0,96	0,96	0,96	0,96	0,98	0,98	0,98
Кількість капітальних ремонтів за 10 років	1	1	1	1	2	2	2
Викиди CO <sub>2</sub> +NO <sub>2</sub> , тон/рік	10524	2266,7 9	12579	2373	1532	11100	8771
Теплова потужність, кВт	4160	4160	4160	4160	10920	10920	10920
Електрична потужність, кВт	4300	4300	4300	4300	2350	2350	2350
Функція корисності	0,66	0,8	0,4	0,82	0,6	0,25	0,3

Як видно з таблиці, кращим є варіант з ГПД на біогазі. Визначимо стійкість отриманого результату до зміни пріоритетів оцінок двигунів. Для цього, додатково до першого, наведеного в табл. 1 варіанта послідовності критеріїв, розглянемо другий (енергетичний) та третій (екологічний) варіанти. Варіант 2 (енергетичний). В ньому послідовність чотирьох перших критеріїв така: електрична потужність генератора, кВт; теплова потужність, кВт; затрати на паливо, млн у. о./рік; капіталовкладення, млн у. о. Варіант 3 (екологічний). В ньому послідовність чотирьох перших критеріїв така: викиди CO<sub>2</sub>+NO<sub>2</sub>, тон/рік; рівень негативного впливу на персонал, %; ймовірність безвідмовної роботи, в. о.; затрати на паливо, млн у. о./рік. Результати розрахунків подані в табл. 2.

Таблиця 2

## Значення функції корисності для енергетичного та екологічного варіантів послідовностей критеріїв

Варіанти	Дизель на дизпаливі	ГПД на природному газі	Дизель на біодизелі В20	ГПД на біогазі	ГТУ на природному газі	ГТУ на газотурбінному паливі	ГТУ на біопаливі
Енергетичний	0,77	0,81	0,7	0,82	0,3	0,2	0,22
Екологічний	0,12	0,37	0,41	0,6	0,87	0,09	0,7

Як видно з табл. 2, кращим є знову ГПД на біогазі. Цей двигун застосуємо для приводу ТНУ. Розрахунок ТНУ показує, що за температури конденсації фреону, яка дорівнює 70 °С, потужність конденсатора складе 10,7 МВт. Сумарна теплова потужність когенераційної та теплонасосної установок складе біля 15 МВт, а термін окупності установок — 5 років. Отже когенераційні установки за їх роботи в базовому режимі є ефективними.

Розглянемо ефективність когенераційних установок за змінних режимів роботи на прикладі СТЕП підприємства. Теплове навантаження підприємства (3 МВт) забезпечує водогрійна котельня на газовому паливі. Електроенергетичні потреби забезпечує електрична мережа. Максимальна споживана електрична потужність підприємства складає 4,3 МВт. Підприємство працює 6500 годин в рік за відносних електричних навантажень: 1...5 %; 0,854...50 %; 0,66...20 %; 0,509...10 %; 0,253...5 %; 0,153...5 %; 0,112...3 %; 0,047...2 % . Метою подальших досліджень є визначення доцільності заміни існуючої СТЕП когенераційним тепловим двигуном. Задачами роботи є розрахунки

експлуатаційних затрат на існуючу СТЕП та на варіанти з дизельним та газотурбінним двигунами на рідких паливах потужністю по 4,3 МВт. За методикою теплового розрахунку дизеля [1] складена програма, за допомогою якої виконані розрахунки двигуна, що працює на дизельному паливі (ДП) та на біодизельному пальному (БП). Порівняння результатів розрахунків показують:

- різниця ефективних питомих витрат БП та ДП складає 32 г/кВт·год;
- з підвищенням частоти обертання колінвала різниця ККД зменшується;
- інтенсивність зниження ефективного ККД зі збільшенням температури зовнішнього середовища однакова;
- в інтервалі ступенів тиску 12...16 ККД дизеля зростає. ККД біодизеля зростає до ступеня тиску 14, а далі несуттєво знижується;
- зі зростанням ступеня віддачі теплоти в охолоднику ККД зростає з однаковою інтенсивністю;
- з підвищенням температури охолоджувального агента на вході в охолодник двигуна ККД біодизеля знижується інтенсивніше.

Розрахунок існуючої СТЕП підприємства показав, що річні експлуатаційні затрати складають 70,6 млн грн., а котельня є збитковою. Річні експлуатаційні затрати на варіанти з дизелем та ГТУ визначались за формулою:

$$Z_{\text{екс.річн.диз.}} = Z_{\text{п}} + Z_{\text{рем}} + Z_{\text{зарп}} + Z_{\text{трансп}} + C_{\text{доплати}} - C_{\text{прод}}, \quad (4)$$

де  $Z_{\text{п}}$  — затрати на паливо;  $Z_{\text{рем}}$  — затрати на ремонт;  $Z_{\text{зарп}}$  — затрати на зарплату дизелістам (турбіністам);  $Z_{\text{трансп}}$  — затрати на транспортування палива;  $C_{\text{доплати}}$  — затрати на закупівлю теплової енергії, недовиробленої когенераційною установкою;  $C_{\text{прод}}$  — виручка від продажу надлишкової теплової енергії.

Розрахунки за допомогою комп'ютерних програм показали, що річні експлуатаційні затрати на дизельну установку склали 89,7 млн грн. Річні експлуатаційні затрати на газотурбінну установку склали 98 млн грн. Тобто, навіть без врахування затрат на придбання двигунів, в цьому випадку вони себе не виправдовують.

## Висновки

1. Розглянуті варіанти застосування когенераційних двигунів в районній водогрійній котельні з постійним тепловим навантаженням гарячого водопостачання.
2. Методом системного аналізу визначено, що найкращим є варіант з газопоршневим двигуном на біогазі.
3. Застосування когенераційних двигунів в водогрійній котельні з постійним тепловим навантаженням є доцільним. Термін окупності теплонасосної установки з газопоршневим приводом складає 5 років.
4. Розглянута система теплоенергопостачання підприємства (СТЕП), в якій теплову енергію забезпечує водогрійна котельня на газі, а електрична енергія береться з електромережі.
5. Виконані розрахунки річних експлуатаційних затрат існуючого варіанта СТЕП та варіантів з когенераційними двигунами. Результати розрахунків показали недоцільність заміни існуючої СТЕП когенераційними двигунами. Причинами цього є: додаткові експлуатаційні затрати, зменшення ККД двигунів зі зменшенням навантаження; висока вартість двигунів. Через жорстку залежність між електричною та тепловою потужностями, зі зниженням навантаження двигуна, необхідна закупівля теплової енергії зі стороннього джерела для компенсації її нестачі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Д. Н. Вырубов, Н. А. Иващенко, и В. И. Ивин, ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова, *Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей*. Москва: Машиностроение, 1983, 372с.
- [2] *Газопоршневая электростанция MWM TCG 2032 V16 (4300 кВт.)*. [Електронний ресурс]. Режим доступа: <http://www.energo-motors.com/gazoporshnevaya-elektrostantsiya-gazovyy-generator-mwm>.
- [3] *Газотурбинные электростанции Мотор Сич — технические характеристики*. [Електронний ресурс]. Режим доступа: <http://www.manbw.ru/analytics/gazoturbinnye-elektrostantsii-motor-sich-technicheskie-harakteristiki.html>.
- [4] Р. Кини *Размещение энергетических объектов: выбор решений*. Москва: Энергоатомиздат, 1983, 320 с.
- [5] В. В. Меньшиков, Ю. И. Солнцева, и А. М. Глинка «Сравнительный анализ видов автомобильного топлива», *Энергия: экономика, техника, экология*, № 1, с. 44-52, 2012.

[6] *Что лучше, надежнее, экономичнее для автономной электростанции: газопоршневые или газотурбинные силовые агрегаты?* [Электронный ресурс]. Режим доступа:

[http://www.manbw.ru/analytics/which\\_is\\_better\\_gas\\_piston\\_or\\_gas\\_turbine\\_power\\_units.html](http://www.manbw.ru/analytics/which_is_better_gas_piston_or_gas_turbine_power_units.html).

[7] *Топливо, состав горючей смеси и продуктов сгорания.* [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<http://www.rightransport.ru/rtos-326-1.html>.

[8] ГОСТ 12.0.003-74\*. *ССБТ. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори.* [Електронний ресурс]. Режим доступу:

<http://www.budinfo.org.ua/.../DST-12-0-003-74-SSBT-Nebezpechni-i-shkidlivi-virobnichi>.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів ВНТУ.

Стаття надійшла до редакції 21.05.2018

**Головченко Олексій Михайлович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів;

**Нанак Олена Миколаївна** — канд. техн. наук, доцент кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, e-mail: e\_nanaka@ukr.net.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**O. M. Golovchenko<sup>1</sup>**  
**O. M. Nanaka<sup>1</sup>**

## **Complex Assessment of Cogeneration Installations on Biofuel at Work Basic and Variable from Basic Loading Mode**

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*The efficiency of cogeneration plants on biofuel in the base and distinct from the basic operating modes is estimated. Cogeneration plants with piston and gas turbine engines and with heat exchangers for water heating with exhaust gases have a fuel efficiency of more than 90%. The engines of these units operate on liquid and gaseous fuels, which are problematic for Ukraine, and therefore, the volumes of biodiesel and biogas use for them are increasing. The existing heat and power supply systems (HPSS) operate both in the basic mode and in variable load schedules.*

*The effectiveness evaluation has been carried out using the system analysis method.*

*There has been considered a district water heating boiler with a constant load of hot water supply during the year, which is 20 MW. Electricity for the own needs of the boiler is taken from the power grid. In the boiler room it is proposed to install a heat pump plant (HPP) with a compressor drive from cogeneration piston or gas turbine engines. The method of system analysis showed that the use of cogeneration engines in a water-heating boiler with a constant heat load is reasonable.*

*Also, the efficiency of cogeneration plants under the variable operating conditions is considered on the example of the enterprise HPSS. The thermal load of the enterprise (3 MW) is provided by a water-heating boiler house with gas fuel. Electricity needs are provided by the electrical network. The maximum consumed electric capacity of the enterprise is 4.3 MW. The enterprise operates 6500 hours a year under relative electric loads. In this case, the performed calculations showed the inexpediency of replacing the existing HPSS with cogeneration engines. The reasons for this are: additional operating costs, a decrease in the efficiency of engines with reduced load, high cost of engines.*

**Keywords:** cogeneration installation, biofuel, heat engine, system of heat supply.

**Golovchenko Oleksii M.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Renewable Energy and Transportation Systems and Electrical Systems;

**Nanaka Olena M.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Renewable Energy and Transportation Systems and Electrical Systems, e-mail: e\_nanaka@ukr.net

## Комплексная оценка когенерационных установок на биотопливе, работающих в базовом и отличных от базового режимах нагрузки

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

*Оценена эффективность работы когенерационных установок на биотопливе в базовом и отличных от базового режимах работы. Когенерационные установки с поршневыми и газотурбинными двигателями и с теплообменниками подогрева воды выхлопными газами имеют КПД использования топлива более 90 %. Двигатели этих установок работают на проблемных для Украины жидких и газообразных топливах, и поэтому, объемы использования биодизеля и биогаза для них увеличиваются. Существующие системы теплоэнергоснабжения (СТЭС) работают как в базовом режиме так и с переменными графиками нагрузок.*

*Оценка эффективности осуществлялась с помощью метода системного анализа.*

*Рассмотрена районная водонагревательная котельная с постоянной в течение года нагрузкой горячего водоснабжения, которое составляет 20 МВт. Электроэнергия на собственные нужды котельной берется из электросети. В котельной предлагается установить теплонасосную установку (ТНУ) с приводом компрессора от когенерационных поршневых или газотурбинных двигателей. Метод системного анализа показал, что применение когенерационных двигателей в водонагревательной котельной с постоянной тепловой нагрузкой целесообразно.*

*Также рассмотрена эффективность когенерационных установок при переменных режимах работы на примере СТЭС предприятия. Тепловую нагрузку предприятия (3 МВт) обеспечивает водонагревательная котельная на газовом топливе. Электроэнергетические потребности обеспечивает электрическая сеть. Максимальная потребляемая электрическая мощность предприятия составляет 4,3 МВт. Предприятие работает 6500 часов в год при относительных электрических нагрузках. Выполненные расчеты показали нецелесообразность замены существующей СТЭС когенерационными двигателями. Причинами этого являются: дополнительные эксплуатационные затраты, уменьшение КПД двигателей с уменьшением нагрузки; высокая стоимость двигателей.*

**Ключевые слова:** когенерационная установка, биотопливо, тепловой двигатель, система теплоэнергоснабжения.

**Головченко Алексей Михайлович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов;

**Нанака Елена Николаевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов, e-mail: e\_nanaka@ukr.net