

О. М. ЛЮБИМЕНКО (канд. ф.-м. наук, доц.), О. А. ШТЕПА (канд. техн. наук, доц.)

Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
e.n.lyubimenko@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ РОБОТИ ТА ВИТРАТИ ПАЛИВА ДЛЯ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ

Виконанні дослідницькі роботи по визначенню умов роботи та визначенню витрати палива в газотурбінній установці. Представлено описання газотурбінної установки, що працює на газоподібному паливі: в звичайному та резервному робочому режимі. Оптимальним режимом роботи газотурбінної установки є комбіноване виробництво теплової та електричної енергії. Проведено дослідження режиму роботи газотурбінної установки при постійному тиску 0,1 МПа та температурі, коли повітря, що знаходиться у компресор газотурбінної установки зі спаленням палива. Виділено і проаналізовано особливості використання енергоносія в газотурбінній установці протягом року. Запропоновано і обґрунтовано вибір прогнозуючої функції по якій краще робити прогноз використання енергоносія на поточний рік. Описано структуру та поточні витрати природного газу в газотурбінній установці для обліку витрат енергоносіїв.

Ключові слова: енергозбереження, газотурбінна установка, тиск, температура, компресор, функції прогнозування

Вступ.

Газотурбінні установки (ГТУ) - генеруючі пристрої (електростанції), на базі газових турбін, якосб'єдну.пм в собі: електрогенератор, редуктор, газову турбіну і блок управління. Та включає додаткове обладнання: компресор, пристрій запуску, апарат теплового обміну.

ГТУ може працювати як на рідкому, так і на газоподібному паливі: в звичайному робочому режимі - на газі, а в резервному (аварійному) - автоматично перемикається на дизельне паливо. Оптимальним режимом роботи газотурбінної установки є комбіноване виробництво теплової та електричної енергії. ГТУ в енергетиці працюють як в базовому режимі, так і для покриття пікових навантажень.

Сформульована мета визначає наступні завдання дослідження [1-2]:

- аналіз особливостей умов витрат енергоносія;
- сформулювати концептуальні принципи прогнозування використання газу;
- запропонувати прогноз споживання та проаналізувати основні його переваги.

Матеріал і методика експерименту

Проведемо дослідження газотурбінної установки при постійному тиску 0,1 МПа та температурі 10°C, коли повітря, що знаходиться у компресор газотурбінної установки зі спаленням палива. Ступінь підвищення тиску в компресорі 7,0. У компресорі відбувається адіабатний стиск повітря. Температура газів перед турбіною $t_3=1073$ К. Витрата повітря через компресор $G = 42$ кг/с.

В результаті проведених досліджень треба визначити параметри ідеального циклу ГТУ; підведене і відведене тепло; термічний ККД ГТУ; роботу циклу; теоретичні потужності турбіни, компресора і всієї ГТУ; параметри всіх крапок дійсного циклу (з обліком необоротності процесів розширення і стиску в турбіні і компресорі), прийнявши внутрішні відносний ККД турбіни $\eta_{oi}^k = 0,79$ і компресора $\eta_{oi}^T = 0,82$.

Для початку напишемо наші початкові дані.

$c_p = 1,004$ кДж/(кг·К); $P_1 = 0,1$ МПа; $c_v = 0,716$; $k = c_p/c_v = 1,401$

де k – показник адіабати повітря

Визначимо температури t_2 , t_4 теоретичного циклу ГТУ.

Процес 1-2 – адіабатний стиск повітря у компресорі:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} = 283 \cdot 7,0^{\frac{1,401-1}{1,401}} = 493,94 \text{ К}$$

При здійсненні циклу за двома адіабатами та двома ізобарами:

$$T_4 = \frac{T_1 \cdot T_3}{T_2} = \frac{283 \cdot 1073}{493,4} = 614,77 \text{ К}$$

Теплота у циклі підводиться у ізобарному процесі 2-3:

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2) = 1,004(1073 - 493,94) = 581,4 \text{ кДж/кг}$$

Відвід теплоти у ГТУ здійснюється ізобарно у процесі 4-1:

$$q_2 = c_p(T_4 - T_1) = 1,004(614,77 - 283) = 333,1, \text{ кДж/кг}$$

Робота циклу:

$$\ell_{ц} = q_1 - q_2 = 581,4 - 333,1 = 248,3 \text{ кДж/кг}$$

Термічний ККД визначається тільки для теоретичного циклу:

$$\varepsilon_t = \frac{\ell_{ц}}{q_1} = \frac{248,3}{581,4} = 0,430$$

Теоретичні потужності, кВт:

$$\text{— турбіни} \quad N_{тo}^T = G(h_3 - h_4) = G \cdot c_p(t_3 - t_4) = 42 \cdot 1,004 \cdot (800 - 341,77) = 19322,6 \text{ кВт};$$

$$\text{— компресора} \quad N_{о}^K = N^T = G(h_2 - h_1) = G \cdot c_p(t_2 - t_1) = 42 \cdot 1,004 \cdot (220,94 - 10) = 8894,9 \text{ кВт};$$

$$\text{— ГТУ} \quad N_{о}^{ГТУ} = N_{о}^T - N_{о}^K = 19322,6 - 8894,9 = 10427,7 \text{ кВт}$$

Проведемо розрахунок температур t_5 , t_6 дійсного циклу.

Температура t_5 повітря наприкінці незворотнього стиску на виході з компресора:

$$t_5 = \frac{t_2 - t_1}{\eta_{oi}^K} + t_1 = \frac{220,94 - 10}{0,79} + 10 = 277,01^\circ\text{C}$$

Температура t_6 наприкінці незворотнього розширення на виході з турбіни:

$$t_6 = t_3 - \eta_{oi}^T \cdot (t_3 - t_4) = 800 - 0,82 \cdot (800 - 341,77) = 424,25^\circ\text{C}$$

Внутрішній ККД ГТУ

$$\eta_{i}^{ГТУ} = \frac{(t_3 - t_6) - (t_5 - t_1)}{t_3 - t_5} = \frac{(800 - 424,25) - (277,01 - 10)}{800 - 277,01} = 0,207$$

Дійсна потужність, кВт:

$$\text{— турбіни} \quad N_{тд} = G(h_3 - h_6) = G \cdot c_p(t_3 - t_6) \text{ або } N_{тд}^T = N_{о}^T \cdot \eta_{oi}^T = 19322,6 \cdot 0,82 = 15844,53 \text{ кВт};$$

$$\text{— компресора} \quad N_{д}^K = G(h_5 - h_1) = G \cdot c_p(t_5 - t_1) \text{ або } N_{д}^K = N_{о}^K / \eta_{oi}^K = 8894,9 / 0,79 = 7026,97 \text{ кВт};$$

$$\text{— ГТУ} \quad N_{д}^{ГТУ} = N_{тд}^T - N_{д}^K = 15844,53 - 7026,97 = 8817,56 \text{ кВт}.$$

Спрогнозуємо споживання природного газу для газотурбінної установки на поточний рік з використанням лінійної, періодичної та лінійно-періодичної прогнозуючої функції. Порівняємо якість отриманих прогнозуючих функцій.

Вихідні дані по споживанню природного газу для газотурбінної установки за цей рік наведено в таблиці 1.

Обчислимо емпіричні коефіцієнти прогнозуючих рівнянь [1]:

— лінійної функції

—

$$a = \frac{\sum_{t=1}^n y_t \sum_{t=1}^n t^2 - \sum_{t=1}^n t \sum_{t=1}^n y_t t}{n \sum_{t=1}^n t^2 - (\sum_{t=1}^n t)^2}$$

$$b = \frac{n \sum_{t=1}^n y_t t - \sum_{t=1}^n t \sum_{t=1}^n y_t}{n \sum_{t=1}^n t^2 - (\sum_{t=1}^n t)^2}$$

та періодичної функції

$$a = \frac{\sum_{t=1}^n y_t}{n} = \frac{16478}{12} = 1512,27;$$

$$b = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cdot \cos \frac{2\pi}{n} t = \frac{2}{12} \cdot 16478 \cdot \cos \frac{2 \cdot 3,14}{12} \cdot 12 = 30,24;$$

$$c = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cdot \sin \frac{2\pi}{n} t = \frac{2}{12} \cdot 16478 \cdot \sin \frac{2 \cdot 3,14}{12} \cdot 12 = 9,63.$$

Таблиця 1. Споживання природного газу газотурбінною установкою по місяцях

Місяць	№ місяця, t	y_t , обсяг спожитого газу (тис. м ³)	$y_t \cdot t$	t^2
Січень	1	2232	2232	1
Лютий	2	1960	3920	4
Березень	3	2015	6045	9
Квітень	4	750	3000	16
Травень	5	775	3875	25
Червень	6	750	4500	36
Липень	7	775	5425	49
Серпень	8	775	6200	64
Вересень	9	750	6750	81
Жовтень	10	1395	13950	100
Листопад	11	2100	23100	121
Грудень	12	2201	26412	144
СУМА	78	16478	105409	

Обчислимо емпіричні коефіцієнти прогнозуючих рівнянь [1]:

- лінійної функції

$$a = \frac{\sum_{t=1}^n y_t \sum_{t=1}^n t^2 - \sum_{t=1}^n t \sum_{t=1}^n y_t t}{n \sum_{t=1}^n t^2 - (\sum_{t=1}^n t)^2}$$

$$b = \frac{n \sum_{t=1}^n y_t t - \sum_{t=1}^n t \sum_{t=1}^n y_t}{n \sum_{t=1}^n t^2 - (\sum_{t=1}^n t)^2}$$

Та періодичної функції [1]:

$$a = \frac{\sum_{t=1}^n y_t}{n} = \frac{16478}{12} = 1512,27;$$

$$b = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cdot \cos \frac{2\pi}{n} t = \frac{2}{12} \cdot 16478 \cdot \cos \frac{2 \cdot 3,14}{12} \cdot 12 = 30,24;$$

$$c = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cdot \sin \frac{2\pi}{n} t = \frac{2}{12} \cdot 16478 \cdot \sin \frac{2 \cdot 3,14}{12} \cdot 12 = 9,63.$$

Після розрахунку коефіцієнтів напишемо рівняння функції[1]:

- лінійної функції

$$\hat{y}_t = 2232 + 21,401t \text{ (тис. м}^3\text{)};$$

- періодичної функції

$$\hat{y}_t = 1512,27 + 30,24 \cdot \cos \frac{2\pi}{n} t + 9,63 \cdot \sin \frac{2\pi}{n} t \text{ (тис. м}^3\text{)}$$

По отриманим результатам побудуємо графіки функції (рис.1) та нанесемо дослідні точки. Порівняємо якість отриманих прогнозуючих функцій, для цього визначимо середньоквадратичне відхилення (СКВ). Отримано значення середньоквадратичне відхилення наведено нижче [1]:

- лінійної функції

$$\sigma_{y_t} = \sqrt{\sum_{t=1}^n \frac{(y_t - \hat{y}_t)^2}{(n-1)}} = 83,32 \text{ (тис. м}^3\text{)}$$

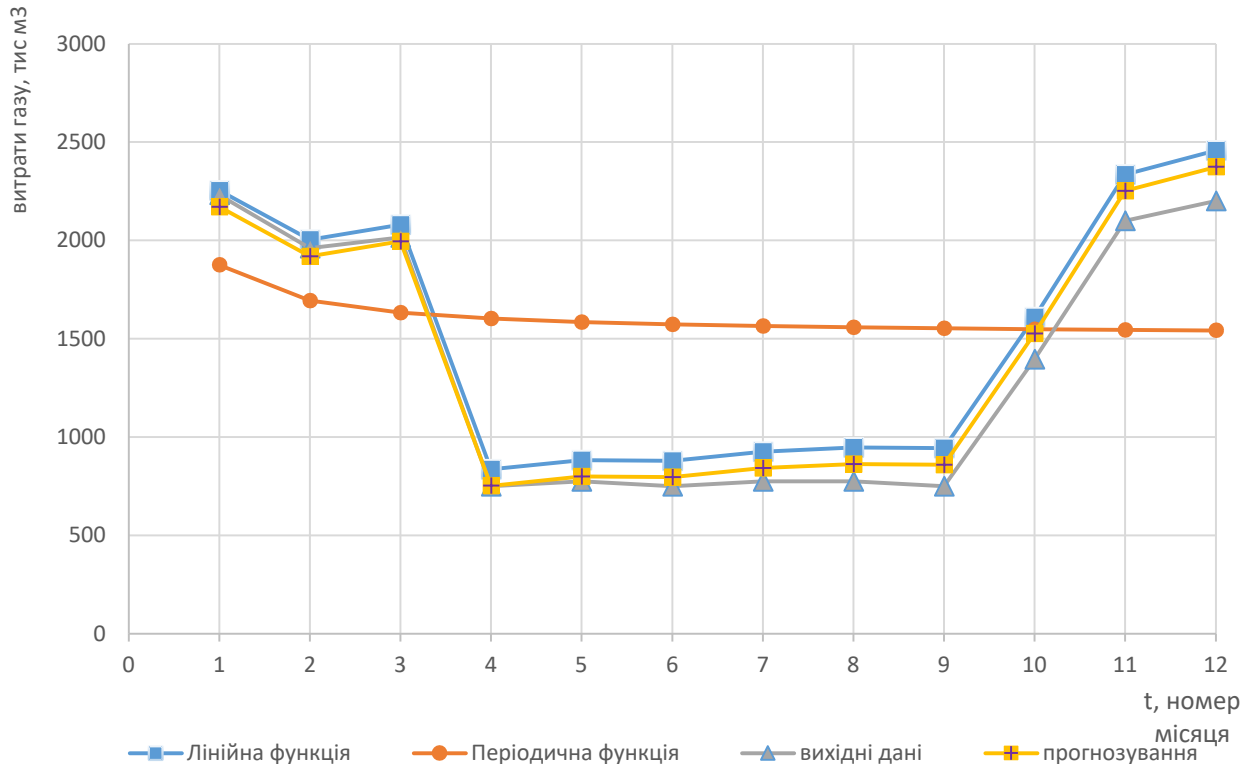


Рисунок 1 - Графіки функцій прогнозу використання газу та дослідних точок поточного року

- періодичної функції

$$\sigma_{y_t} = \sqrt{\sum_{t=1}^n \frac{(y_t - \hat{y}_t)^2}{(n-1)}} = 9,76 \text{ (тис. м}^3\text{)}$$

Аналіз отриманих значень середньоквадратичного відхилення, що характеризує похибку прогнозу, показує необхідність використання лінійної прогнозуючої функції. Тому за її допомогою зробимо прогноз на поточний рік, зобразимо це графічно (рис. 1, крива прогнозування).

Прогностичні оцінки з використанням періодичної функції зводяться до такого:

- Очікуваний рівень споживання природного газу визначається співвідношенням

$$\hat{y}_t = 1512,27 + 30,24 \cdot \cos \frac{2\pi}{n} t + 9,63 \cdot \sin \frac{2\pi}{n} t \text{ (тис. м}^3\text{)}$$

- Середньоквадратичне відхилення, що характеризує похибку прогнозу, дорівнює 83,32 тис. м³.
- Протягом 72 місяців зі 100 очікуваних коливань споживання природного газу відносно значень, визначених лінійною прогнозуючою функцією, становлять 328,4 тис. м³.
- Періодичність обсягів споживання обумовлена сезонними витратами на опалення, тому лінійна прогнозуюча функція дозволяє отримати точніший прогноз порівняно з періодичною прогнозуючою функцією.
- Прогнозоване значення річного споживання природного газу становить 18603 тис. м³.

Висновки.

В результаті дослідження запропоновано обґрунтування концепції розрахунку прогнозуючої функції для обліку витрат не відновлюваних енергетичних ресурсів для газотурбінної установки, які використовують природний газ. Це в свою чергу забезпечує ефективне планування та підвищення економічної ефективності роботи підприємства. Усе це дозволяє регулювати режими та витрати використання палива під час експлуатації ГТУ при обмежених обсягах природного газу. Проведено дослідження режиму роботи газотурбінної установки при постійному тиску 0,1 МПа та температурі 10°C, коли оптимальним режимом роботи газотурбінної установки є комбіноване виробництво теплової та електричної енергії.

Наукова новизна дослідження полягає у формулюванні обґрунтування концептуальних принципів побудови математичної моделі використання та обліку витрат енергоносіїв на основі використання прогнозуючих функцій і надання рекомендацій, як раціонально використати природні ресурси, які не відновлюються. доступних ресурсів та врахування типових особливостей об'єкту автоматизації.

Практична значущість роботи полягає у прогнозуванні та розрахунках об'єму споживання природного газу (тис. м³) підприємством на наступний рік, а це в свою чергу дозволяє скорегувати витрати газу на майбутнє та прийняти обґрунтовані рішення як . можливо зменшити витрату палива або максимально ефективно його використовувати.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Любименко О. М., Штепа О. А., Артеменко Ю.А., Деркач О.О. Прогнозування використання не відновлюваних енергоресурсів на теплоелектростанції // Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія: «Електротехніка і енергетика» – 2019. – Т. 45, № 1(21). – С. 47–52.
2. Про затвердження плану заходів із впровадження систем енергетичного менеджменту в бюджетних установах. Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 26 квітня 2017 р. № 732-р

REFERENCES

1. Lyubimenko O. M., Shtepa O. A., Artemenko YU.A., Derkach A.A. Prognozirovaniye ispol'zovaniye ne vossta-lyuvaniykh energoresursov na teploelektrostantsii // Nauchnyye trudy Donetskogo natsional'nogo tekhniko-go universiteta Seriya «Elektrotehnika i energetika» - 2019. - T. 45, № 1 (21). - С. 47-52.
2. On Approval of the Plan of Measures for the Implementation of Energy Management Systems in Budgetary Institutions. By the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 26, 2017, No. 732-p [Pro zatverdzhennja planu zahodiv iz vprovadzhennja sistem energetichnogo menedzhmentu v bjudzhetnih ustanovah. Rozporjadzhennjam Kabinetu Ministriv Ukraїni vid 26 kvitnja 2017 r. № 732-r]

Надійшла до редколегії 23.10.2020

Рецензент: Нікіфоров А. П.

E.N. LYUBIMENKO, A.A. SHTEPA

State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

Study of operating conditions and consumption fuel for a gas turbine plant. Carrying out research work to determine the working conditions and determine the fuel consumption in a gas turbine installation. The descriptions of a gas turbine unit operating on gaseous fuel are presented: in normal and standby operating modes. The optimal operating mode of the gas turbine plant is combined: the production of heat and electricity. A study of the operating mode of a gas turbine unit at a constant pressure of 0.1 MPa and a temperature when air enters the compressor of a gas turbine unit with fuel combustion has been carried out. The features of the use of an energy carrier in a gas turbine unit during the year are highlighted and analyzed. The structure and current consumption of natural gas in a gas turbine unit for accounting for the consumption of energy carriers is described. As a result of the study, a substantiation of the concept of calculating the predictive function for accounting for the costs of non-renewable energy resources for a gas turbine plant, used natural gas, is proposed. This, in turn, ensures effective planning and increasing the economic efficiency of the enterprise. All this makes it possible to regulate the modes and costs of using fuel during the operation of a gas turbine unit. A study of the operating mode of the gas turbine unit at a constant pressure of 0.1 MPa and a temperature of 10 ° C was carried out, when the optimal operating mode of the gas turbine unit is the combined production of thermal and electrical energy. The choice of the predicting function by which it is better to forecast the use of the energy carrier for the current year has been proposed and substantiated. The scientific novelty of the research lies in the formulation of the substantiation of the conceptual principles for the construction of a mathematical model of the use and accounting of energy consumption based on the use of predictive functions and recommendations are provided on how to rationally use natural resources. The practical significance of the work lies in forecasting and calculating the volume of natural gas consumption (thousand m³) by the enterprise for the next year, and this, in turn, allows us to adjust the gas consumption for the future and make informed decisions on how it is possible to reduce fuel consumption or use it as efficiently as possible.

Keywords: *energy saving, gas turbine unit, pressure, temperature, compressor, forecasting functions*