

УДК 621.311.22

М. М. Чепурний, к. т. н., доц.

## ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ПАРОТУРБІННИХ І ГАЗОТУРБІННИХ ТЕПЛОЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛЕЙ

*Проаналізовано сучасні методи для визначення ефективності роботи теплоелектроцентралей та виявлені їх недоліки. Запропоновано просту методику і отримано зручні формули для визначення економії палива на паротурбінних і газотурбінних теплоелектроцентралях.*

### Характеристика проблеми

Загальновідомо, що застосування теплоелектроцентралей (ТЕЦ) для сумісного виробництва теплоти та електроенергії зумовлює економію палива в енергосистемі. Що стосується оцінки цієї економії, то існує багато методів її визначення [1—12]. В переважній кількості випадків для оцінки ефективності використання палива на ТЕЦ традиційно застосовуються значення питомої витрати умовного палива на виробництво теплової  $v_T$ , кг/ГДж і електричної  $v_e$ , кг/(кВт·год) енергії, а також, зв'язані з ними через тепловий еквівалент умовного палива, відповідні коефіцієнти корисної дії  $\eta_T$  і  $\eta_e$ :

$$\eta_T = \frac{34,14}{\eta_e} \quad \text{і} \quad \eta_e = \frac{0,123}{\sigma_e} . \quad (1)$$

Використання цих показників найчастіше пояснюється необхідністю мати обґрунтовані тарифи на види енергопродукції (теплоти та електроенергії), що відпускаються споживачам. Однак не можна не зазначити той факт, що на однакових енергоустановках з однаковими енергетичними характеристиками тарифи на теплову і електричну енергію на різних підприємствах, тим більше в різних регіонах, в більшості випадках неоднакові. Виходить, що тарифи на види енергопродукції залежать не тільки від енергетичної ефективності устаткування, але й від господарчої діяльності енергопідприємства.

Раніше (в часи адміністративної економіки) для ТЕЦ було однаково як поділити оплату за електроенергію та теплоту — кошти за споживані види енергії цілком йшли державі. Тепер виробники і споживачі цих видів енергії різні. Разом з тим, відповідно до нової економічної системи необхідно, щоб самі ТЕЦ отримували відповідний економічний ефект. Все це створює значні складності в оцінюванні реального ефекту в системі енергопостачання. В разі використання однотипного устаткування для виробництва теплоти та електроенергії витрачаються загальні матеріальні, трудові та грошові ресурси. Вимір конкретного виду зазначених ресурсів на виробництво окремого виду енергії практично здійснити неможливо. В той же час знання окремих витрат необхідно для раціонального використання енергоресурсів. Не дивно, що пошуки об'єктивної оцінки витрат палива з окремих видів енергії точаться практично з моменту зародження ТЕЦ і донині. Додаткова складність полягає в різній споживчій цінності електроенергії та теплоти, а, отже, у великій різниці витрати палива на виробництво цих видів енергопродукції.

Використовуваний в Радянському Союзі так званий фізичний метод, передбачав, що значення питомої витрати умовного палива на відпущену теплову енергію обчислюється за величиною ККД нетто енергетичних котлів і змінюється в межах 40,6...41,8 кг/ГДж, що перевищує його значення для опалювальних і промислових котелень, які працюють на природному газі. Іншим недоліком цього методу є неможливість врахувати цінність відпущеної теплоти, якість якої характеризується тиском і температурою теплоносія. Виходило, що за умови сталої витрати теплоносія (пари або води) вартість теплоти залишалась незмінною. Власне саме тому виникла тенденція будувати котельні, які виявились вигіднішими, ніж енергетичні котли.

В зв'язку з цим виникла необхідність під іншим кутом зору розглядати такі поняття як ефектив-

ність виробництва електроенергії та тепловому постачанні. Крім того, цей метод виявився придатним тільки для паротурбінних ТЕЦ з теплофікаційними турбінами. Тому не дивно, що замість фізичного методу розробляються і постійно пропонуються багато інших методів для визначення питомих витрат умовного палива за видами виробленої енергії, основними серед яких є: ексергетичний, термодинамічний, економічний та інші [1—10]. Суть зазначених методів так чи інакше зводиться до визначення коефіцієнта пропорційності для розподілу палива на виробництво видів енергетичної продукції  $K_e$ . Загальною особливістю цих методів є те, що значення коефіцієнта  $K_e$  завжди більше значення, обчисленого за фізичним методом, крім випадку відпуску теплоти споживачам у вигляді свіжої (гострої) пари, коли  $K_e$  дорівнює одиниці. Зрозуміло, що питома витрата умовного палива на відпущену теплоту часто-густо стає дуже наближеною до теплового еквівалента або навіть менше за нього, тобто відповідає умові  $\eta_T \geq 1$ , з чим важко погодитись. Таке явище наочно проілюстровано в [6], де здійснено порівняльний аналіз методів розподілу палива між енергоносіями. Головне те, що не можна, наприклад, зробити висновок, яка із двох ТЕЦ працює більш ефективно, та що має показники  $v_e = 0,32$  кг/(кВт·год) і  $v_T = 0,37$  кг/ГДж або та, для якої ці показники складають  $v_e = 0,24$  кг/(кВт·год) і  $v_T = 43$  кг/ГДж.

В більшості випадків [1, 2, 4, 5, 9] коефіцієнт пропорційності  $K_e$  містить так званий коефіцієнт цінності теплоти (КЦТ)  $\xi$ , який для паротурбінних ТЕЦ має враховувати потенціал відбірної пари. Не можна не зазначити недоліків такого підходу. По-перше, для гострої пари незалежно від її потенціалу (тиску і температури)  $\xi = 1$ . За допомогою КЦТ неможливо пояснити для чого застосовують високі та надкритичні параметри пари на ТЕС і ТЕЦ. По-друге, для ТЕЦ з відпуском пари різних параметрів виникають певні труднощі у визначенні  $\xi$ . Нарешті, з впровадженням ефективних газотурбінних технологій не зрозуміло, як визначити КЦТ для ГТУ—ТЕЦ, в яких відпрацьовані в газовому двигуні продукти згорання палива надходять в котел-утилізатор, де підігрівають воду для теплофікації. Насамкінець зазначимо, що методики з визначенням  $K_e$  відрізняються громіздкістю і складністю їх застосування персоналом електростанцій.

### Основні результати

В роботах [11, 12] наголошується, що одним із показників ефективності роботи комбінованих установок з відпуску теплоти та електроенергії має бути величина відпуску електроенергії на тепловому постачанні, тобто

$$\varepsilon = N_B / Q_B, \quad (2)$$

де  $N_B$  і  $Q_B$  — електрична і теплова потужність, яка відпускається споживачам, відповідно.

Правомірність такого твердження легко перевірити. Так, наприклад, в [7] ефективність роботи ТЕЦ рекомендується за допомогою коефіцієнтів корисної дії: ККД з відпуску електроенергії  $\eta_e$  і абсолютного ККД ТЕЦ з відпуску електроенергії  $\eta_e^a$ , які визначаються за формулами:

$$\eta_e = N_B / (Q_{II} - Q_B); \quad (3)$$

$$\eta_e^a = N_B / Q_{II}, \quad (4)$$

де  $Q_{II} = B Q_H^P$  — теплова потужність спаленого палива;  $B$  і  $Q_H^P$  — витрата і теплота згорання палива, відповідно.

На підставі (2), (3), (4) неважко отримати

$$\eta_e = \varepsilon \alpha_T / (1 - \alpha_T); \quad (5)$$

$$\eta_e^a = \varepsilon \alpha_T, \quad (6)$$

де  $\alpha_T = Q_B / Q_{II}$  — частка теплової потужності спаленого палива, яка відпущена тепловим споживачам.

Отже, коефіцієнт  $\varepsilon$  насправді є однією із складових ККД, що характеризують ефективність роботи ТЕЦ, але в ніякому разі не може однозначно оцінювати цю ефективність.

Останнім часом все найчастіше ефективність роботи енергоустановок ТЕЦ пропонується оцінювати за допомогою коефіцієнта використання теплоти палива [7, 9, 11, 12], який враховує сума-

рні втрати енергії та дуже легко визначається на практиці

$$K_{\text{ВТП}} = \alpha_T / (1 + \varepsilon). \quad (8)$$

Із порівняння (5), (6) і (7) випливає, що всі коефіцієнти, за допомогою яких пропонується оцінювати економічність роботи ТЕЦ, містять однакові складові і неоднозначно характеризують ефективність використання палива. Зокрема коефіцієнт  $K_{\text{ВТП}}$  збільшується зі збільшенням величини відпуску теплоти і набуває максимального значення, яке дорівнює ККД енергетичного котла, за умови нульового виробництва електроенергії. Виходить, що застосування енергоустановок для комбінованого виробництва і відпуску теплоти та електроенергії завжди пов'язані зі зменшенням значень  $K_{\text{ВТП}}$ . Разом з тим, як зазначалось раніше, використання комбінованого виробництва і відпуску енергопродукції зумовлює певну економію палива в порівнянні з роздільною схемою енергопостачання (електроенергії від конденсаційних ТЕС і теплоти від котелень).

Якщо б виробництво і відпуск теплоти  $Q_B$  і електроенергії  $N_B$  здійснювалось за роздільною схемою, то витрата палива становила

$$B_{\text{роз}} = B_{\text{кот}} + B_{\text{КЕС}} = \frac{Q_B}{(Q_H^P \eta_K)} + \frac{N_B}{(Q_H^P \eta_{\text{КЕС}} \eta_{\text{ТР}})} = \frac{Q_B}{Q_H^P} \left( \frac{1}{\eta_K} + \frac{\varepsilon}{(\eta_{\text{КЕС}} \eta_{\text{ТР}})} \right), \quad (9)$$

де  $\eta_K$  — ККД енергетичних котлів;  $\eta_{\text{КЕС}}$  і  $\eta_{\text{ТР}}$  — ККД конденсаційних електростанцій і ККД транспортування електроенергії в електромережах, відповідно.

В разі комбінованого виробництва цих видів енергопродукції на паротурбінних ТЕЦ витрата палива на підставі (2) і (7) дорівнювала б

$$B_{\text{ПТУ}} = \frac{(N_B + Q_B)}{(Q_H^P K_{\text{ВТП}})} = \frac{Q_B (1 + \varepsilon)}{(Q_H^P K_{\text{ВТП}})} = \frac{Q_B}{(Q_H^P \alpha_T)}. \quad (10)$$

Тоді економія палива в енергосистемі за рахунок теплофікації складатиме

$$\Delta B_{\text{ПТУ}} = B_p - B_{\text{ПТУ}} = \alpha_K B_{\text{ПТУ}} \left( \frac{1}{\eta_K} + \frac{\varepsilon}{\eta_{\text{КЕС}} \eta_{\text{ТР}}} - \frac{1}{\alpha_T} \right). \quad (11)$$

Із (11) видно, що для заданих значень  $\eta_K$ ,  $\eta_{\text{КЕС}}$  і  $\eta_{\text{ТР}}$  економія палива в енергосистемі тим більше, чим більше частка теплової потужності, що відпущена споживачам, і частка виробництва електроенергії на тепловому постачанні. Зазначене вище підтверджується практикою експлуатації паротурбінних ТЕЦ.

Для газотурбінних ТЕЦ утилізаційного типу, тепла потужність, яка відпускається тепловим споживачам із котла-утилізатора, згідно з [13] дорівнює

$$Q_B = \psi (1 - \eta_T) B_{\text{ГТУ}} Q_H^P = \phi B_{\text{ГТУ}} Q_H^P, \quad (12)$$

де  $\psi = (t_T - t_{\text{КУ}}) / (t_T - t_{\text{НС}})$  — міра утилізації теплоти відпрацьованих в ГТУ продуктів згорання палива в котлі-утилізаторі;  $t_T$  і  $t_{\text{КУ}}$  — температура газів на вході в котел-утилізатор і на виході з нього, відповідно;  $t_{\text{НС}}$  — температура навколишнього середовища;  $B_{\text{ГТУ}}$  — витрата палива на ГТУ.

З урахуванням (12) економія палива на ГТУ–ТЕЦ в порівнянні з роздільною схемою енергопостачання становитиме

$$\Delta B_{\text{ГТУ}} = \phi B_{\text{ГТУ}} \left( \frac{1}{\eta_K} + \frac{\varepsilon}{\eta_{\text{КЕС}} \eta_{\text{ТР}}} - \frac{1}{\alpha_T} \right). \quad (13)$$

Таким чином, отримані прості та зручні для практичного використання співвідношення, які дозволяють визначати економію палива в енергосистемі на ПТУ–ТЕЦ і ГТУ–ТЕЦ. Економія палива не відноситься конкретно ані до теплоти, ані до електроенергії. Системна економія палива визначається з урахуванням змін в інших елементах системи енергопостачання, що працює сумісно. Величина цієї економії виражена в певних частках від загальної витрати палива на ТЕЦ. Очевидно, що досконалість роботи конкретної ТЕЦ тим вище, чим більшу економію палива в даній системі енергопостачання вона здатна забезпечити. Нарешті, за величиною економії палива на ТЕЦ в грошовому вимірі можна розподіляти прибуток між окремою ТЕЦ і енергооб'єднанням, до складу якого вона входить.

Інколи [4] для оцінки ефективності роботи ТЕЦ пропонується використовувати коефіцієнт віднос-

ної економії палива  $\beta$  — відношення величини економії палива  $\Delta B$  до загальної витрати палива на ТЕЦ В. Якщо в (11) і (13) однаковий вираз, що стоїть в дужках, позначити через А, то коефіцієнти відносної економії палива на ТЕЦ матимуть вигляд

$$\beta_{\text{ПТУ}} = \alpha_{\text{Т}} \beta_{\text{ГТУ}} = \varphi A. \quad (14)$$

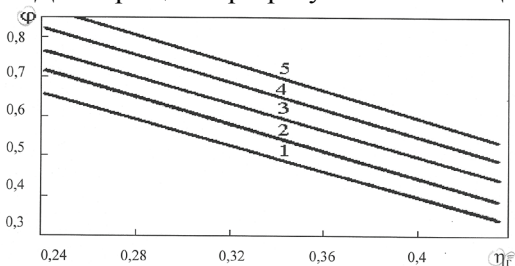
Відразу ж зауважимо, що за допомогою цього коефіцієнта не можна порівнювати ефективність роботи ТЕЦ різного типу і з різним енергетичним устаткуванням. Ним можна користуватись тільки для оцінки досконалості даної ТЕЦ в разі зміни умов експлуатації або в разі змін в тепловій схемі ТЕЦ.

Тепер проілюструємо на прикладі оцінку ефективності роботи ТЕЦ різних типів за запропонованою методикою. Порівняльні розрахунки виконувались для типових енергоустановок, які серійно виготовляються на енергомашинобудівних підприємствах. Оцінювалась ефективність роботи ПТУ–ТЕЦ і ГТУ–ТЕЦ як однакової електричної, так і однакової теплової потужності. В основу ПТУ–ТЕЦ покладена парова теплофікаційна турбіна Т-25-90 із загальною витратою пари 130 т/год і витратою пари на теплофікацію 90 т/год [14]. Розглядалось два варіанта ГТУ–ТЕЦ: з газотурбінною установкою ГТД-25000, електрична потужність якої дорівнювала електричній потужності ПТУ; з двома газотурбінними установками, теплова потужність яких дорівнювала тепловій потужності ПТУ. Основні характеристики енергоустановки наведені в порівняльній таблиці.

Характеристики і показники роботи ТЕЦ

Показники	Тип енергоустановки		
	Т-25-90	ГТД-25000	2 ГТУ-20
Електрична потужність, МВт	25	25	40
Теплова потужність, МВт	56	33,5	55
Параметри робочого тіла перед турбіною:			
тиск, МПа	8,82	2,18	1,7
температура, °С	535	1250	1133
Параметри робочого тіла за турбіною:			
тиск, кПа	5	117	119
температура, °С	27	490	520
Коефіцієнт корисної дії ГТУ	—	0,358	0,36
Витрата умовного палива, кг/с	3,295	2,4	3,8
Теплова потужність продуктів згорання палива, МВт	96,54	70,32	111,34
Коефіцієнт $\varphi$	—	0,4866	0,494
Коефіцієнт $\alpha_{\text{Т}}$	0,5829	0,4768	0,494
Виробництво електроенергії на тепловому постачанні, $\epsilon$	0,4355	0,7381	0,722
Економія умовного палива в порівняно з роздільною схемою енергопостачання, кг/с	1,41	1,51	2,45
Коефіцієнт відносної економії палива	0,428	0,629	0,644

Передбачалось, що теплофікаційні установки працюють на газоподібному паливі. Тому електрична потужність власних потреб ПТУ оцінювалась в 2,5 % від електричної потужності, а електрична потужність власних потреб ГТУ — в 1,2 %. Вважалось, що в системі теплофікації мережна вода підігривається від 50 до 100 °С. В зв'язку з цим, для забезпечення температурного напору на вході в котел-утилізатор ( $\Delta t > 50$  °С) температура продуктів згорання на виході з нього вибрана в 130 °С. Крім того, вважалось, що:  $\eta_{\text{К}} = 0,91$ ;  $\eta_{\text{КЕС}} = 0,35$ ;  $\eta_{\text{ТР}} = 0,92$ ;  $t_{\text{НС}} = 15$  °С. Результати розрахунків зведені в таблицю. Для спрощення розрахунків ГТУ–ТЕЦ на рисунку показані розрахункові значення коефіцієнта  $\varphi$ .



Залежності  $\varphi = f(\eta_{\text{Т}}, \psi)$ : 1 —  $\psi = 0,66$ ;  
2 — 0,7; 3 — 0,74; 4 — 0,78; 5 — 0,82

Розрахункові дані свідчать про переваги комбінованої схеми енергопостачання порівняно з роздільною схемою. Застосування ПТУ–ТЕЦ дає до 40 % економії умовного палива, а застосування ГТУ–ТЕЦ — до 60 %. В разі однакової електричної потужності ПТУ–ТЕЦ і ГТУ–ТЕЦ величина економії палива відрізняється менше як на 7 %. В той же час коефіцієнт відносної економії палива на ПТУ–ТЕЦ на 20 % менше, ніж на ГТУ–ТЕЦ.

Останнє свідчить про правомірність твердження щодо неможливості використання цього коефіцієнта як

показника ефективності роботи ТЕЦ різних типів. В разі однакової теплової потужності ТЕЦ на ГТУ–ТЕЦ електроенергії виробляється на 60 % більше, ніж на ПТУ–ТЕЦ. Приблизно на таку ж величину більше і економія палива.

### Висновки

1. Аналіз наявних методів визначення ефективності роботи ТЕЦ показав їх громіздкість, недоліки та недоречності.

2. Для завжди відомих на практиці значень витрат палива, відпущеної теплоти та електроенергії визначення ефективності роботи ПТУ–ТЕЦ і ГТУ–ТЕЦ за запропонованою методикою здійснюється дуже просто і дозволяє уникнути недоречностей, які властиві методикам, пов'язаним з розподілом палива на виробництво теплоти та електроенергії.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ГКД 34.09.108-98. Розподіл витрат палива на відпущену електричну і теплову енергію при їх комбінованому виробництві: Методичка НДІ Енергетики. — К., 1998. — 22 с.
2. Калинов В. Ф., Киселев В. П. Опыт внедрения новой методики расчета показателей тепловой экономичности ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка, 1998. — № 1. — С. 24—30.
3. Дудовской С. В. Термодинамический метод определения объективных показателей тепловой экономичности ГТУ–ТЭЦ простого цикла // Пром. теплоэнергетика, 2000. — Т. 22. — № 2. — С. 85—89.
4. Читашвили Г. П. Сравнительный анализ энергоэффективности паротурбинных и газотурбинных ТЭЦ // Теплоэнергетика, 2003. — № 11. — С. 58—61.
5. Винницький І. П., Герасимов С. М., Гут П. О. Спрощений метод визначення витрат палива на відпущену електричну і теплову енергію за їх комбінованого виробництва на теплових електростанціях // Енергетика и электрификация, 2004. — № 8. — С. 42—45.
6. Чепурний М. М., Ткаченко С. Й., Бужинський В. В. До питання про розподіл витрат палива між видами енергопродукції в когенераційних установках, утворених на базі котельні і ГТУ // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2004. — № 4. — С. 33—36.
7. Попырин Л. С., Дильман М. Д., Беляева Г. М. Эффективность технического перевооружения ТЭЦ на базе парогазовых установок // Теплоэнергетика. — 2006. — № 2. — С. 34—39.
8. Евенко В. И., Стребков А. С. Анализ топливной экономичности газотурбинных ТЭЦ // Теплоэнергетика, 2006. — № 10. — С. 74—78.
9. Киселев Г. П., Астахов Н. Л. О тепловой эффективности теплоэлектроцентралей // Энергетик. — 2006. — № 3. — С. 19—22.
10. Кузнецов А. М. Экономия топлива при переводе турбин в теплофикационный режим // Энергетик. — 2007. — № 1. — С. 21—22.
11. Андрищенко А. И. О показателях совершенства проектируемых и эффективности эксплуатации действующих ПТУ–ТЭЦ // Изв. вузов и энергообъединений СНГ. Энергетика. — Минск. — 2001. — № 4. — С. 78—85.
12. Андрищенко А. И. Важнейшие особенности энергосбережения на городских ТЭЦ и оценки эффективности их технического усовершенствования // ЭСТА. — 2003. — № 3. — С. 23—27; WWW.ESTA.GOM.UA.
13. Рейсиг В. А., Чепурной М. Н., Бужинский В. В. Энергетические характеристики парогазовых установок с котлами-утилизаторами // Пром. теплотехника. — 2003. — Т. 25. — № 1. — С. 61—64.
14. Теплотехнический справочник / Под ред. В. Н. Юренева и П. Д. Лебедева. — М.: Энергия, 1975. — Т. 1. — 743 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Надійшла до редакції 29.09.07  
Рекомендована до друку 20.12.07

**Чепурний Марко Миколайович** — професор кафедри теплоенергетики.  
Вінницький національний технічний університет