

М. М. Чепурний, к. т. н., доц.; Н. В. Резидент, к. т. н.
**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ
ВІД ПРОМИСЛОВИХ ТЕПЛОЦЕНТРАЛЕЙ**

Здійснено порівняльний аналіз термодинамічної та економічної ефективності сумісного (від теплоелектроцентралею) і роздільного (на електростанціях і котельнях) енергопостачання.

Ключові слова: котельня, електростанція, теплоелектроцентрально, умовне паливо.

Вступ

Ефективність виробництва енергії є важливою характеристикою паливовикористальних установок і визначається витратою палива. За умови здорожчання органічного палива актуальною стає задача енергозабезпечення. Промислові підприємства споживають, переважно, теплову енергію (у вигляді гарячої води або пари) та електричну енергію. Найефективнішим засобом енергозбереження є комбіноване виробництво електроенергії та теплоти, яке значною мірою розв'язує завдання енергозбереження і відображено на законодавчому рівні [1].

Між тим, енергозабезпечення великої кількості промислових підприємств здійснюється за так званою роздільною схемою, коли теплопостачання здійснюється від котельні, а електроенергії – від електромережі. Загальновідомо, що комбіноване виробництво теплоти та електроенергії зумовлює економію палива в енергосистемі та зменшує техногенне навантаження на довкілля. Щодо оцінки цієї економії, то запропоновано багато методів, які не є досконалими. У переважній більшості з них ефективність роботи теплоелектроцентралею (ТЕЦ) пропонують визначати за допомогою коефіцієнтів корисної дії (ККД) з виробництва електроенергії та теплоти. Аналіз методів оцінки ефективності роботи комбінованих установок здійснено в [2, 3], де показано неслухність таких методів через неможливість чіткого визначення часток загальної витрати палива, які йдуть на виробництво теплоти та електроенергії в цій комбінованій установці. У [3] з'ясовано, що ефективність роботи комбінованої установки залежить від двох чинників: коефіцієнта виробництва електроенергії на тепловому постачанні ε та частки теплової потужності спаленого палива α_T , яку витрачено на виробництво теплоти:

$$\varepsilon = \frac{N}{Q}; \alpha_T = \frac{Q}{B \cdot Q_n^p}, \quad (1)$$

де N і Q – електрична та теплова потужності виробленої електроенергії та теплоти відповідно; B – витрата палива; Q_n^p – теплота згорання палива.

Крім того, у [3] виявлено, що вплив ε і α_T на ефективність роботи комбінованих установок різних типів має різні закономірності. Додаткова складність полягає в різній споживчій цінності електроенергії та теплоти, а отже, у різній витраті палива на виробництво цих видів енергопродукції. Отже, коректна оцінка ефективності використання палива за видами енергопродукції від комбінованої установки досить складна. Тому визначення питомих витрат умовного палива на виробництво електроенергії та теплоти не можуть бути, як це вважалося [4, 5], основою для формування тарифів на ці види енергопродукції. Оптові ціни на електроенергію та теплоту визначають суто за ринковими законами, а співвідношення між цінами за одиницю (1 МВт·год) виробленої електроенергії та теплоти якраз і характеризують цінність зазначених видів енергопродукції на сьогодні.

На ТЕЦ промислових підприємств використовують паротурбінні установки різних типів: протитискові турбіни типу Р і ПР призначені для відпуску технологічної пари. При цьому споживачам постачається вся пара, яка надходить на турбіну. У турбінах типу П промисловим споживачам постачається технологічна пара із промислового відбору. У турбінах типу Т

пара із відбору підігріває мережну воду системи теплофікації. Турбіни типу ПТ мають як промисловий, так і теплофікаційні відбори пари. Теплові схеми паротурбінних установок (ПТУ), окрім ПТУ з протитисковими турбінами, мають конденсатор для конденсації відпрацьованої в турбіні пари. Наявність конденсатора, як відомо, зменшує термодинамічну ефективність ПТУ. Досвід показує, що не завжди установки з більш високою енергетичною ефективністю є економічно вигіднішими.

Зважаючи на вищевикладене, ставилась задача здійснити порівняльний аналіз термодинамічної та економічної ефективності сумісного (на ТЕЦ з різними ПТУ) і роздільного (на конденсаційних електростанціях і котельнях) виробництва електричної та теплової енергії.

Основні результати

Під термодинамічною ефективністю будемо розуміти питому витрату умовного палива на виробництво одиниці енергії, саме на виробництво, а не на відпуск. Відпущена енергія залежить від ступеня досконалості експлуатації енергетичного устаткування, якості автоматичного регулювання основного і допоміжного устаткування, стану транспортувальних мереж та ін. Для промислових підприємств енергопостачання від ТЕЦ порівняно з роздільною схемою має перевагу, оскільки виробництво теплової та електричної енергії здійснюються за місцем споживання і не пов'язано зі суттєвими втратами в транспортувальних мережах.

Для порівняльного аналізу ефективності енергоспоживання за роздільною та комбінованою схемами вибрано всі типи паротурбінних установок (ПТУ), характерні для промислових ТЕЦ невеликої потужності. Основні характеристики ПТУ за [6] зведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики паротурбінних установок

Показники	Паротурбінні установки					
	Р-6-35/5	ПР-6-35(10)5	П-6-35/5	Р-12-35/5	Т-12-35	ПТ-12-35/10
Температура пари за турбіною, °С	225	225	29	225	29	29
Температура пари в промисловому відборі, °С	-	300	-	-	-	300
Температура пари в теплофікаційному відборі, °С	-	-	-	-	105	105
Витрата пари на турбіну, т/год	60	80,5	55,8	114,7	90	119
Витрата пари в промисловий відбір, т/год	-	30,5	-	-	-	50
Витрата пари в теплофікаційний відбір, т/год	-	-	-	-	65	40
Витрата пари в конденсатор, т/год	-	-	15,8	-	16,5	29

Усі ПТУ, які наведено в табл. 1, мають однакові початкові параметри пари (тиск 3,5 МПа і температуру 435 °С), а також однакову температуру живильної води, яка дорівнює 150 °С. Ентальпії пари, конденсатів пари та води визначено з таблиць [8]. Коефіцієнти корисної дії (ККД) промислових парогенераторів на ТЕЦ і котлів системи роздільного енергопостачання вибрано також однаковими, значення яких становить 0,9. Зрозуміло, що порівняння показників комбінованої (на ТЕЦ) і роздільної роботи (на конденсаційних електростанціях і котельнях) здійснювались за умови рівних значень електричної N і теплової Q потужностей. При цьому середній ККД конденсаційних станцій в енергосистемі складає 0,35, а ККД електричних мереж – 0,9.

Сумарну теплову потужність (МВт), вироблену в ПТУ, визначають за формулою, МВт:

$$Q = \sum_{i=1}^n D_i (h_i - h'_i) \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

де D_i – витрата пари в цьому відборі, кг/с; h_i та h'_i – ентальпія відібраної пари та конденсату цієї пари відповідно.

Коефіцієнт ε , що характеризує виробництво електроенергії на тепловому постачанні, об-

числюють за (1).

Потужність парогенератора ТЕЦ обчислюють за відомою формулою, МВт:

$$Q_{ПГ} = D_0 [(h_0 - h'_{жсв}) + \alpha_{np} \cdot (h'_{np} - h'_{жсв})] \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

де D_0 – витрата пари на ПТУ, кг/с; $\alpha_{np} = 0,03$ – частка продувальної води; h_0 – ентальпія пари за парогенератором; $h'_{жсв}$, h'_{np} – ентальпія живильної та продувальної води відповідно.

Витрата умовного палива, яке спалюють у топці парогенератора ПТУ, кг/с:

$$B_y = \frac{Q_{ПГ}}{(Q_y \cdot \eta_{ПГ})}, \quad (4)$$

де $Q_y = 29,3$ МДж/кг – теплота згорання умовного палива; $\eta_{ПГ}$ – ККД парогенератора.

Частку теплової потужності палива α_T , яка витрачена на виробництво теплоти, визначають за (1).

Коефіцієнт використання теплоти палива:

$$K_{ВТП} = (N + Q) / (B_y \cdot Q_y) = \alpha_T (\varepsilon + 1). \quad (5)$$

Питома витрата умовного палива на виробництво енергії за [3], кг/ГДж:

$$\epsilon_y^{ТЕЦ} = 34,143 / K_{ВТП}. \quad (6)$$

У разі енергопостачання за роздільною схемою витрата умовного палива на конденсаційних електростанціях (КЕС) $B_{КЕС}$, у котельні B_K і сумарна витрата B_C складатимуть, кг/с:

$$B_{КЕС} = \frac{N}{Q_y \cdot \eta_{КЕС} \cdot \eta_{ем}}; B_K = \frac{Q_{ПГ}}{Q_y \cdot \eta_K}; B_C = B_{КЕС} + B_K, \quad (7)$$

де $\eta_{КЕС}$ і $\eta_{ем}$ – ККД КЕС і електромереж відповідно; η_K – ККД котла.

Питома витрата умовного палива на одиницю виробленої енергії, кг/ГДж:

$$\epsilon_y^P = \frac{B_C \cdot 10^3}{(N + Q)}. \quad (8)$$

Економія умовного палива на ТЕЦ порівняно з роздільною схемою енергопостачання, т/год.:

$$\Delta B = 3,6 \cdot (B_C - B_y). \quad (9)$$

Величина економії умовного палива характеризує перевагу комбінованої схеми енергопостачання над роздільною як з енергетичного, так і з екологічного поглядів. Порівняльною характеристикою термодинамічної ефективності слід вважати відношення коефіцієнтів використання теплоти палива, тобто:

$$K_{TE} = K_{ВТП}^{ТЕЦ} / K_{ВТП}^P, \quad (10)$$

де $K_{ВТП}^{ТЕЦ}$ і $K_{ВТП}^P$ – коефіцієнт використання теплоти палива на ТЕЦ і для роздільної схеми енергопостачання відповідно.

Коефіцієнт K_{TE} показує у скільки разів ефективність використання палива в комбінованій (когенераційній) схемі енергопостачання вища, ніж у роздільній. Якщо $K_{TE} > 1$, доцільна когенераційна схема, а коли $K_{TE} < 1$, то навпаки. Розрахункові показники роботи систем енергопостачання за умови однакової теплової та електричної потужності зведені в табл. 2.

Таблиця 2

Основні показники роботи систем енергопостачання

Показники	Тип паротурбінної установки					
	Р-6- 35/5	ПР-6- 35(10)5	П-6- 35/5	Р-12- 35/5	Т-12- 35	ПТ-12- 35/10
	Когенераційна система					
Теплова потужність парогенератора, МВт	44,559	57,336	41,431	85,162	66,825	88,342
Витрата умовного палива, кг/с	1,690	2,174	1,571	3,230	2,534	3,350
Вироблена теплова потужність, МВт	38,512	51,336	29,702	75,596	41,172	63,526
Коефіцієнт виробництва електроенергії на тепловому постачанні	0,156	0,117	0,202	0,159	0,291	0,189
Частка потужності палива на виробництво теплоти	0,778	0,806	0,645	0,799	0,555	0,647
Коефіцієнт використання теплоти палива	0,899	0,900	0,776	0,926	0,716	0,769
Питома витрата умовного палива, кг/ГДж	38,0	37,9	44,0	36,9	47,7	44,4
Роздільна схема						
Витрата умовного палива на виробництво електроенергії, кг/с	0,650	0,650	0,650	1,300	1,300	1,300
Витрата умовного палива на виробництво теплоти, кг/с	1,460	1,947	1,126	2,867	1,561	2,409
Загальна витрата умовного палива, кг/с	2,111	2,597	1,776	4,167	2,861	3,709
Коефіцієнт використання теплоти палива	0,72	0,75	0,69	0,72	0,63	0,69
Питома витрата умовного палива, кг/ГДж	47,43	45,31	49,78	47,59	53,84	49,13
Порівняльні показники						
Економія умовного палива на ТЕЦ, т/год.	1,515	1,521	0,739	3,375	1,179	1,293
Показник термодинамічної ефективності	1,249	1,194	1,131	1,290	1,129	1,107

Із табл. 2 видно, що термодинамічна ефективність усіх паротурбінних установок, які працюють за комбінованою схемою енергопостачання, вища за ефективність енергопостачання за роздільною схемою. Найефективніше (на 20 – 29 %) працюють ПТУ із протитисковими турбінами. Ефективніша робота когенераційних установок забезпечує відповідну економію палива і зменшує техногенне навантаження на довкілля. Як правило, електрична та теплофікаційна потужність промислових підприємств набагато менша за сталу промислово-теплову потужність. Тому в структурі промислових ТЕЦ мають переважати саме протитискові турбіни. Це пояснюється не тільки їхньою ефективнішою роботою, але й відсутністю громіздкої системи технічного водопостачання та витратами на неї.

На відміну від промислових, ТЕЦ, призначені для теплофікації (опалення й гарячого водопостачання), мають змінну (сезонну) потужність. Їхнє завантаження в опалювальний період на 70 – 80 % більше, ніж в неопалювальний. Тому робота теплофікаційних турбін у неопалювальний період наблизатиметься до роботи в чисто конденсаційному режимі. У цьому разі ефективність виробництва електроенергії в таких турбінах може поступатись ефективності виробництва її на потужних конденсаційних електростанціях, які працюють з більш високими початковими параметрами пари, а отже, і з більш високими ККД. Завдяки цьому, ефективність виробництва енергії в таких турбінах в неопалювальний період може виявитися навіть нижчою, ніж у разі енергопостачання за роздільною схемою. Тому теплофікаційні ТЕЦ рекомендовано комплектувати двома протитисковими турбінами для покриття теплового навантаження в опалювальний та неопалювальний періоди [9].

Оцінимо економічну ефективність зазначених систем енергопостачання. Будемо вважати, що довжина і якість теплових мереж від ТЕЦ і котельні однакові, а теплові втрати в них складають 13 %. Оцінимо втрати в електромережі від ТЕЦ у 5 %, а витрати електроенергії на власні потреби також у 5 %. Втрати електроенергії в мережах енергосистеми для роздільної схеми енергопостачання вже враховано. Будемо вважати, що показником економічної ефективності енергопостачання є відношення виторгу за видані види енергії до витрати на пали-

во.

Витрати на паливо, грн.:

$$Z_n = C_n \cdot B \cdot 3,6 \cdot \tau, \quad (11)$$

де C_n – ціна палива, грн./тонну; B – витрата палива, кг/с; τ – певний термін роботи, год.

Виторг за теплоту, грн.:

$$V_T = C_T \cdot Q \cdot (1 - \Delta q) \cdot \tau, \quad (12)$$

де C_T – ціна відпущеної теплоти, грн./(МВт·год); Δq – частка теплових втрат у мережі.

Виторг за електроенергію, грн.:
на ТЕЦ:

$$V_e = C_e \cdot N \cdot (1 - \Delta e_{em} - \Delta e_{en}) \cdot \tau; \quad (13)$$

для роздільної схеми:

$$V_e = C_e \cdot N \cdot \tau, \quad (14)$$

де C_e – ціна електроенергії, грн./(МВт·год); Δe_{em} – частка власних потреб; Δe_{en} – частка втрат в електромережі.

Показник економічної ефективності:

$$\eta_e = (V_T + V_e) / Z_n. \quad (15)$$

Для прикладу визначимо показник економічної ефективності енергопостачання від ТЕЦ з турбіною Р-6-35/5 (див. табл. 2) і показник економічної ефективності енергопостачання за роздільною схемою для однакових потужностей $N = 6$ МВт, $Q = 38,512$ МВт. Будемо вважати, що: $C_n = 3000$ грн. за тонну; $C_T = 500$ грн. за МВт·год; $C_e = 1000$ грн. за 1 МВт·год; $\tau = 1$ год. Результати порівняльних розрахунків показано в табл. 3.

Таблиця 3

Порівняльні показники економічної ефективності енергопостачання

Показники	Схема енергопостачання	
	ТЕЦ	Роздільна
Витрата на паливо, грн.	18249	22794
Виторг за теплоту, грн.	16752,7	16752,7
Виторг за електроенергію, грн.	5400	6000
Загальний виторг за енергоносії, грн.	22152,7	22752,7
Показник економічної ефективності	1,214	0,9982

Із табл. 3 видно, що показник економічної ефективності енергопостачання від ТЕЦ перевищує значення цього показника в разі енергопостачання за роздільною схемою. Відносний показник економічної ефективності енергопостачання дорівнює: $\eta_{es} = \eta_e^{ТЕЦ} / \eta_e^p = 1,214 / 0,9982 = 1,216$. Для цього ж варіанту в табл. 2 значення відносного показника термодинамічної ефективності складає 1,249. Зазначимо також, що найбільше впливає на економічну ефективність енергопостачання ціна палива, темп зростання котрої, зазвичай, випереджає темп зростання вартості теплоти та електроенергії. Зрозуміло, що важливим чинником підвищення економічної ефективності енергопостачання є зменшення втрат електроенергії та теплоти.

Висновки

1. Термодинамічна і економічна ефективність у разі комбінованого виробництва та відпуску енергії на промислових ТЕЦ будь-якої структури завжди вищі, ніж для роздільної схеми енергопостачання.

2. Термодинамічна ефективність енергопостачання завжди перевищує економічну ефекти-

вність.

3. Найбільше впливає на економічну ефективність справляє ціна палива.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання складного потенціалу // Відомості Верховної Ради, 2005. – № 20. – С. 278 – 285.
2. Чепурний М. М. Ефективність роботи паротурбінних і газотурбінних теплоелектроцентралей / М. М. Чепурний // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 2. – С. 36 – 40.
3. Показники ефективності роботи енергетичних установок для сумісного виробництва теплової та електричної енергії [Електронний ресурс] / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – № 1. – 2010. Режим доступу до журн.: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2010_1/2010-1.files/uk/10mmcaee_ua.pdf.
4. ГДК 34.09.108.98. Розподіл витрат палива на відпущену електричну і теплову енергію при їх комбінованому виробництві: Методика НДІ Енергетики. – Київ, 1998. – 22 с.
5. Вінницький І. П. Спрощений метод визначення витрат палива на відпущену електричну і теплову енергію за їх комбінованого виробництва на теплових електростанціях / І. П. Вінницький, С. М. Герасимов, П. О. Гут // Енергетика и электрификация. – 2004. – № 8. – С. 42 – 45.
6. Теплотехнический справочник / [под ред. В. Н. Юренева и П. Д. Лебедева]. – М.: Энергия, 1975. – т. 1. – 744 с.
7. Чепурний М. М. Енергозбережні технології в теплоенергетиці / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 114 с.
8. Ривкин С. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара / С. А. Ривкин, А. А. Александров. – М.: Энергоатомиздат, 1980. – 142 с.
9. Чепурний М. М. Сучасні проблеми теплофікації / М. М. Чепурний, Н. В. Пішеніна, О. В. Куцак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 5. – С. 68 – 71.

Чепурний Марко Миколайович – к. т. н., доцент, професор кафедри теплоенергетики.

Резидент Наталія Володимирівна – к. т. н., старший викладач кафедри теплоенергетики.
Вінницький національний технічний університет.