

УДК 620.313

В.П. ДРЬОМІН, канд. техн. наук, Г.П. КОСТЕНКО, О.В. ЗГУРОВЕЦЬ (Інститут загальної енергетики НАН України, Київ)

## АНАЛІЗ ВИТРАТ ПАЛИВА БЛОКАМИ ТЕС І МОЖЛИВОСТЕЙ ЇХ ЕКОНОМІЇ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

Проаналізовано витрати палива блоками ТЕС за різних режимів експлуатації блоків. Виявлено, що одним із перспективних шляхів економії паливно-енергетичних ресурсів є залучення споживачів-регуляторів до регулювання графіка електричних навантажень. Виконано орієнтовну оцінку економії палива при регулюванні електроспоживання.

Очікуваний дефіцит в органічному енергетичному паливі на паливному ринку України через обмеженість власних запасів нафти і газу, а також через повільні темпи реструктуризації й оновлення вугледобувної галузі значною мірою загострюється через низьку ефективність спалювання палива на теплових електростанціях (ТЕС). Це зумовлено граничним моральним і фізичним зносом теплоенергетичного устаткування теплових електростанцій України [1].

Енергосистема несе значні додаткові витрати, спричинені нерівномірністю режиму споживання, отже, і виробництва електроенергії. Це пов'язано з необхідністю використання маневрених потужностей, які характеризуються підвищеними капіталовкладеннями і питомими витратами палива. У зв'язку з цим необхідно відзначити, що одним зі шляхів зниження витрат на вироблення електроенергії є вирівнювання графіка енергосистеми. Вирівнювання графіка навантаження енергосистеми частково здійснюється (і може здійснюватися в ще більших масштабах в подальшому) за рахунок споживачів-регуляторів, які знижують свої навантаження в години пікових навантажень енергосистеми і переносять їх у позапікові зони.

При цьому, що більш нерівномірним буде режим електроспоживання (що більше навантаження у споживача в піковій зоні графіка навантаження енергосистеми і менше в позапіковій), то ефективнішим буде використання споживача-регулятора. Особливо вигідними для енергосистеми є потужні споживачі-регулятори, які належать до базового навантаження енергосистеми. Споживачі електроенергії зацікавлені в регулюванні графіка навантаження енергосистеми лише за наявності тарифів на електроенергію, диференційованих за зонами доби, оскільки регулювання графіка навантаження пов'язане з певними витратами і втратами з боку споживачів електроенергії.

Одними з найпоказовіших величин, що характеризують енергетичну та економічну ефективність роботи блоків теплових електричних станцій (ТЕС) і водночас зумовлюють ефективність функціонування системи паливо-

використання в енергетиці, є величини питомих витрат палива (умовного і натурального) на відпуск електричної енергії.

Для того, щоб оцінити енергетичну та економічну ефективність роботи блоків ТЕС, виконується порівняльна оцінка нормативних питомих витрат умовного (або переведеного в натуральне) палива на відпуск електричної енергії та фактичних питомих витрат палива.

Аналіз питомих витрат палива на відпуск електроенергії по роках (з 1990-го по 2007-й) виявив, що питомі витрати палива з 1990 року поступово зростали з 346 г/кВт·год до 365 г/кВт·год в 1995-1997 рр., згодом з 1999 року було досягнуто позначки 375 г/кВт·год, яка з невеликими коливаннями утримувалась і надалі (усереднені дані по електростанціях Мінпалив-енерго України). За планами, ще 2005 року середній показник мав досягти рівня 1995 року (365 г/кВт·год), проте без модернізації генеруючого обладнання та без комплексної оптимізації його використання зменшити питомі витрати палива виявилось неможливо.

Найвищі показники – на блоках до 200 МВт (Придніпровська, Луганська, Старобешівська, Добротвірська ТЕС), показники на яких досягають 390–422 г/кВт·год. Це пояснюється фізичним зносом блоків та якістю вугілля, а також тим, що ці блоки використовуються для покриття пікового навантаження в енергосистем, що прискорює їхній знос і погіршує експлуатаційні та економічні характеристики.

Останнім часом теплові електростанції країни щорічно споживали палива від 29,4 до 30,4 млн. т у.п. усього, в тому числі: вугілля – від 15,4 до 19,5 млн. т у.п.; природного газу – від 13,8 до 10,5 млн. т у.п. (12,1 – 9,2 млрд. куб.м); мазуту – від 0,2 до 0,4 млн. т у.п. [2].

Рівень цін на різні види енергетичного палива на ринку енергоносіїв України в період з 1997-го по 2003 рік коливався в таких межах:

– паливо власного видобутку: природний газ – від 75 дол. США за 1 тис. куб.м; енергетичне вугілля – від 80 дол. США за 1 т; коксівне вугілля – 300 дол. США за 1 т;

– паливо за імпортом: російський природний газ – від 179,5 дол. США за 1 тис м<sup>3</sup>; туркменський природний газ – 135 дол. США за 1 тис м<sup>3</sup>; вугілля (польське, російське) – від 80 дол. США за 1 т у.п.; мазут – від 125 дол. США за тону.

При залученні споживачів-регуляторів на період пікових навантажень в енергосистемі (6 годин на добу) можна буде не використовувати для покриття пікових навантажень від 200 до 500 МВт генеруючих потужностей теплових електростанцій з питомими витратами палива, близькими до середніх по ТЕС Мінпаливенерго України – 373 г.у.п./кВт·г, то можна буде заощаджувати щомісяця орієнтовно 17000 т у.п.. За вартості 1 т у.п. близько від 150 дол. США, лише загальна вартість палива, без врахування інших обов'язкових витрат, становитиме приблизно 14,0 млн. грн. на місяць. За рік показники економії сягатимуть 204 тис. т у.п. загальною вартістю від 165,0 млн. грн., що становитиме від 0,65% до 0,70% загально-річного обсягу споживання палива.

Проведено порівняльний аналіз витрат палива в різних розрізах для блоків 150 МВт (Добровірівська ТЕС), 175 МВт (Зміївська ТЕС, перемарковано з 200 МВт через використання низькосортного палива), 300 МВт (Вуглегірська ТЕС) та 800 МВт (Вуглегірська ТЕС) за даними Мінпаливенерго [3-6] на планові пуски блоків 300 та 800 МВт. Результати аналізу представлено в табл. 1.

При зменшенні часу простою блока 300 МВт до 6-10 годин порівняно з пуском з холодного стану, витрати палива зменшуються на 42,35%, тоді як для блока 800 МВт цей показник становить 54%.

З табл. 2 видно, що при роботі енергоблоків на вугіллі зростання витрат палива при роботі

**Таблиця 1.** Витрати палива на планові пуски енергоблоків потужністю 300 та 800 МВт

	Тривалість простою, год	Витрати палива на пуск, $b_{пуск}$ , т	
		300 МВт	800 МВт
1	Холодний стан	173,7	599,3
2	50-60	158,7	448,1
3	30-35	141,1	433,1
4	15-20	136,4	430,0
5	6-10	100,3	276,1

зі зменшеним навантаженням у відсотковому співвідношенні дещо вище, ніж при роботі на газі чи мазуті. При цьому зниження навантаження блоку до мінімуму (близько 50% номінальної потужності) збільшує витрати палива на виробництво електричної енергії на 15% (вугілля) для блоків 150 МВт, на 13,4% (вугілля) та на 11,6% (газ) для блоків 200 МВт, на 8,5% (вугілля) та на 7,7% (газ) для блоків 300 МВт, на 7,9% (мазут) та на 7,9% (газ) для блоків 800 МВт. Як видно, якраз для найбільш маневрених блоків зміни витрат палива найбільш суттєві.

**Врахування впливу внутрішніх та зовнішніх факторів при розрахунку питомих витрат палива.** Поправки до базових нормативних питомих витрат палива на відпущену електричну енергію. Зміни теплової економічності енергетичної установки, викликані причинами, що не залежать від персоналу електростанції, оцінюються поправками на зміну:

- температури холодного повітря;
- температури повітря на вході в підігрівач повітря;

**Таблиця 2.** Нормативні питомі витрати палива на відпущену електричну енергію для блоків ТЕС при роботі з різним навантаженням на основному і резервному видах палива, г/кВт·год

		Потужність, МВт										
		70	90	94	109	117,5	120	130	145			
1	150 МВт											
	Суміш вугілля та газу	432,5	405,97	402,12	389,7	386,39	385,28	381,32	376,56			
2	175 (200) МВт	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
	Суміш вугілля та газу	450,61	439,1	429,97	422,55	416,39	411,13	406,74	403,07	400,22	398,28	397,43
	газ	396,49	388,51	382,02	376,56	371,87	367,69	364,06	360,90	358,31	356,41	355,36
3	300 МВт	160	180	200	220	240	260	280	300			
	Суміш вугілля та газу	367,69	359,66	353,95	349,6	346,07	343,88	341,76	339,3			
	газ	347,1	340,54	336,07	332,23	328,7	326,73	324,5	322,22			
4	800 МВт	400	450	500	550	600	650	700	750	800		
	Мазут	354,12	347,59	342,28	337,92	334,38	331,95	329,89	328,6	328,16		
	Газ	352,36	344,85	339,33	335,41	332,71	330,29	327,56	325,72	326,45		

**Таблиця 3.** Поправки до нормативних характеристик витрат палива для блоків різної одиничної потужності при роботі на різних видах палива

№	Поправки: види, значення супутні показники	Потужність блоків та види спалюваного палива						
		800 МВт		300 МВт		200 (175) МВт		150 МВт
		мазут	газ	вугілля	газ	вугілля	газ	вугілля
1	Поправка на зміну температури холодного повітря на -10°C.							
	Втрати тепла, %	+0,43	+0,49	+0,56	+0,54	-	-	-
	Зміна ККД брутто, %	-0,43	-0,49	-0,56	-0,54	-	-	-
	Величина поправки витрат палива, %	+0,45	+0,53	+0,63	+0,6	+0,08	+0,08	+0,239
2	Поправка на зміну температури повітря на вході в підігрівач повітря на +10°C.							
	Втрати тепла, %	+0,35	+0,31	+0,158	+0,158	-	-	-
	Зміна ККД брутто, %	-0,35	-0,31	-0,158	-0,158	-	-	-
	Величина поправки витрат палива, %	+0,37	+0,33	+0,18	+0,17	+0,11	+0,11	+0,053
3	Поправка на зміну температури живлячої води на ±10°C.							
	Втрати тепла, %	+0,05	+0,05	+0,09	+0,09	+0,1	+0,1	-
	Зміна ККД брутто, %	-0,05	-0,05	-0,09	-0,09	-0,1	-0,1	-
	Величина поправки витрат палива, %	+0,051	+0,051	+0,01	+0,01	+0,146	+0,1	-
4	Поправка на зміну зольності твердого палива на +1%							
	Зміна ККД брутто, %	-	-	-0,027	-	-0,24	-	-
	Величина поправки витрат палива, %	-	-	+0,03	-	+0,287	-	+0,067
5	Поправка на зміну вологості твердого палива на +1%							
	Зміна ККД брутто, %	-	-	-	-	+0,096	-	-
	Величина поправки витрат палива, %	-	-	-0,008	-	-0,112	-	-0,065
6	Поправка на зміну витрат електроенергії на власні потреби блока на +1%							
	Величина поправки витрат палива, %	+1,02	+1,02	+1,1	+1,1	-	-	-
7	Поправка на зміну калорійності твердого палива на +100 ккал/кг							
	Зміна ККД брутто, %	-	-	-	-	+0,148	+0,148	-
	Величина поправки витрат палива, %	-	-	-	-	-0,184	-0,184	-

- температури циркуляційної води;
- відпуску тепла з відборів турбін;
- планові пуски енергоблоків;
- вприскування живлячої води;
- витрат тепла на власні потреби котла;
- економічності турбіни в міжремонтний період;
- роботи на ковзному тиску;
- якості спалюваного твердого палива;
- старіння обладнання;
- стабілізації режимів;
- витрат електричної енергії на власні потреби при простой блоку за рахунок роботи блоків і загальноцехових механізмів;
- витрат електричної енергії на власні потреби для забезпечення надійного функціонування блоків.

Нижче наведено результати зведеного аналізу поправок для енергетичного устаткування різної одиничної потужності (табл. 3).

В результаті аналізу наявної інформації виявлено, що за деяких змін параметрів (наприклад,

на зміну температури повітря на вході в підігрівач повітря) витрати палива на виробництво електричної енергії блоками більшої одиничної потужності (800 МВт) збільшуються майже вдвічі стрімкіше, ніж аналогічні показники блоків меншої одиничної потужності (300, 175 МВт). Для деяких випадків варто проводити додаткові емпіричні дослідження, оскільки може виявитися, що чутливість блоків до зміни важливих для їх функціонування технічних та інших зовнішніх чинників різниться між собою настільки, що це доцільно врахувати при розробці планів і прогнозів подальшого розвитку та модернізації енергоблоків теплових електростанцій.

Змінний режим роботи ТЕС призводить до додаткових витрат енергії, що збільшує витрати палива на виробництво електроенергії. Додаткові витрати палива залежать від проходження мінімуму та максимуму добових електричних навантажень, кількістю зупинок-пусків агрегатів ТЕС з гарячого та холодного станів, норми і фактичні

показники витрат палива на пуски та зупинки агрегатів з гарячого і холодного станів, кількість годин роботи в змінних режимах та обсяги відпуску електроенергії в ці години.

Оцінка економічного та паливного ефекту від регулювання електроспоживання шляхом залучення споживачів-регуляторів.

Регулювальні заходи можна розділити на наступні види: такі, що безперервно діють протягом року і не вимагають додаткових капіталовкладень; такі, що періодично діють протягом року і вимагають додаткових капіталовкладень; перспективні, здійснення яких вимагає додаткових капіталовкладень. Регулювання режиму електроспоживання можна здійснювати за рахунок створення спеціальних режимів роботи споживачів (споживачів-регуляторів). Регулювання споживаної потужності в години максимуму навантаження зазвичай проводиться за таким планом:

- визначення глибини регулювання 30-хвилинної потужності за черговий квартал з графіків електричного навантаження минулого року;
- виявлення споживачів, що працюють у період максимуму навантаження енергосистеми, і характеру необхідності їх участі у виробничому процесі;
- аналіз споживачів за їх економічною ефективністю;
- прогнозування максимальної 30-хвилинної потужності споживача на черговий квартал;
- розрахунок максимальної 30-хвилинної потужності на черговий квартал;
- розробка оптимальних планів-графіків регулювальних заходів, впровадження яких сприяє вирівнюванню графіків і зниженню вжитку електричної потужності в період максимуму навантаження енергосистеми.

Вирівнювання графіка навантаження електроенергетичної системи забезпечує зниження питомих витрат палива на виробництво електричної енергії [8]. Однак робота споживачів у режимі регулювання електроспоживання, направлено на вирівнювання графіка навантаження ЕЕС, може призвести до додаткового збільшення витрат енергетичних ресурсів на ведення технологічного процесу порівняно з «вільним» режимом.

Розглянемо витрати енергетичних ресурсів у комплексі «енергосистема-споживач» при регулюванні електропостачання. Для ведення технологічного процесу у вільному режимі необхідні електроенергія та  $n$  видів енергоносіїв (паливо,

теплота тощо). Розрахунки ведуться сумарно для трьох областей графіка навантаження енергосистеми (ніч, пік, напівпік). Сумарна кількість необхідних енергоресурсів

$$\mathcal{E}_{\Sigma 0} = \mu \alpha_{\varepsilon} \omega_0 \Sigma \psi_{\varepsilon 0} \varphi_{\varepsilon} + \Sigma q_i \quad (1)$$

При регулюванні електроспоживання також необхідні електроенергія та  $m$  видів енергоносіїв. При цьому сумарне споживання енергоресурсів матиме вигляд

$$\mathcal{E}'_{\Sigma} = \mu \alpha_{\varepsilon} \omega_0 \Sigma \psi'_{\varepsilon} \varphi_{\varepsilon} + \Sigma q_j \quad (2)$$

У наведених формулах (1) і (2)  $\mu$  – коефіцієнт, який враховує витрати електроенергії на власні потреби і втрати в ЕЕС при передачі електроенергії споживачу;  $\alpha_{\varepsilon}$  – коефіцієнт, який враховує зміни питомих витрат електроенергії при режимі з регулюванням;  $\omega_0$  – питоми витрати електроенергії на виробництво одиниці продукції;  $\psi_{\varepsilon}$  – доля витрат електроенергії, що приходить на  $\varepsilon$ -ту область графіка;  $\varphi_{\varepsilon}$  – відносний приріст питомих витрат палива на виробництво 1 кВт·год електроенергії в  $\varepsilon$ -тій області графіка навантаження ЕЕС;  $q_i$  і  $q_j$  – питоми витрати  $i$ -го та  $j$ -го енергоносіїв; індекси «0» і «штрих» означають відповідно режим без регулювання і з регулюванням електроспоживання; всі показники витрат зводяться до умовного палива.

Зазвичай добові графіки навантаження ЕЕС розділяють на чотири області ( $k=4$ ): ніч, ранковий максимум, напівпік та вечірній максимум. Однак часто достатньо враховувати тільки три області: ніч, напівпік та пік (остання область містить тривалість ранкового та вечірнього максимумів).

Вираз  $\Sigma \psi_{\varepsilon 0} \varphi_{\varepsilon}$  – це витрати палива на виробництво 1 кВт·год при роботі у вільному режимі. Нехай  $g_0 = \Sigma \psi_{\varepsilon 0} \varphi_{\varepsilon}$ . Відповідно, витрати палива в режимі з регулюванням складатимуть  $g = \beta g_0$ , де

$$\beta = \frac{\Sigma \psi'_{\varepsilon} \varphi_{\varepsilon}}{\Sigma \psi_{\varepsilon 0} \varphi_{\varepsilon}}, \quad 0 < \beta < 1 \quad (3)$$

Зміна сумарних витрат енергоресурсів на виробництво продукції при переході на режим роботи з регулюванням електроспоживання

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\Sigma 0} - \mathcal{E}'_{\Sigma} = \mu(1 - \alpha_{\varepsilon} \beta) \omega_0 g_0 + \Sigma q_i - \Sigma q_j \quad (4)$$

При  $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} > 0$  перехід у режим регулювання призводить до економії сумарних витрат енергоресурсів на виробництво одиниці продукції, при  $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} < 0$  – до перевитрат.

Умова зниження витрат енергоресурсів при регулюванні електроспоживання виглядає таким чином:

$$\beta < \frac{1}{\alpha_3} + \frac{1}{\alpha_3 \omega_0 g_0 \mu (\sum q_i - \sum q_j)} \quad (5)$$

Проектним паливом для більшості енергетичних блоків ТЕС (встановлена потужність близько 25 млн. кВт, що становить близько 87% загальних встановлених потужностей ТЕС) та кількох ТЕЦ є вугілля, для решти ТЕС і більшості ТЕЦ – природний газ.

Проведемо оцінку потенційного зниження витрат палива на виробництво електричної енергії в енергосистемі України в разі залучення споживачів-регуляторів і впровадженні інших заходів для стимулювання споживачів переносити навантаження з пікових зон у зону провалу. За рахунок споживачів, які погоджуватимуться виступати в ролі регуляторів електричного навантаження та переносити його в зони зниженого попиту (денний та нічний провали графіка електричного навантаження) енергосистема матиме можливість не використовувати для покриття пікових навантажень від 200 до 500 МВт генеруючих потужностей.

Однак необхідно враховувати, що в години нічних провалів електричного навантаження теплові електростанції працюють у неоптимальних режимах зі зниженою потужністю, що призводить до перевитрат палива. Тому виходить, що споживачі-регулятори, які переносять споживання з ранкового та вечірнього піків на нічний провал, деяким чином провокують ці

перевитрати, стимулюючи підвищення середньої ціни за електричну енергію. Таким чином, необхідно віднайти оптимум між задіянням споживачів-регуляторів (відповідно, підвищенням надійності електропостачання в години пікових навантажень) та економічністю (зростання середньої ціни, яка переноситься і на інших споживачів).

Нехай в ЕЕС можливо задіяти  $n$  споживачів-регуляторів. Необхідно використовувати їх так, що показник ненадійності в пікові періоди доби був мінімальним, а середня ціна електроенергії для споживачів (за добу) не перевищувала певного значення. Таким чином

$$\min Q(X) = \min \sum q_i^{x_i+1} \quad \text{при } C(X) = \frac{\sum y_i X_i}{n} = C_0 \quad (6)$$

Таким чином, можна зазначити, що дотримання цих умов дозволить підтримувати в енергетичній системі достатній рівень надійності електропостачання, забезпечуючи при цьому цінову стабільність та високий рівень загальносистемної економічної ефективності. Економічний ефект від залучення споживачів до регулювання графіка електричних навантажень виражатиметься, по-перше, в кількості та вартості зекономленого палива; по-друге, в запобіганні збитків у народному господарстві та у споживачів від недовідпуску електричної енергії; по-третє, в економії коштів на підтримання в робочому стані додаткових резервних потужностей та у скасуванні або в тимчасовому відтермінуванні необхідності побудови нових блоків з високими маневреними можливостями високої вартості.

1. Удод Є.І. Паливно-енергетичні ресурси. Перспективи України // Новини енергетики. 2005. – № 1. – с. 57–61.
2. Структура енергетичних ресурсів у виробітку електричної енергії і тепла електростанціями Мінпаливенерго України// У зб. Паливно-енергетичний комплекс України. Цифри і факти. – К.: КВІЦ, 2003. – С. 6-26.
3. Энергетические характеристики блоков 300 МВт Угледорской ТЭС. – Минэнерго Украины. – 1998.
4. Энергетические характеристики блоков 800 МВт Угледорской ТЭС. – Минэнерго Украины. – 1998.
5. Пояснительная записка к расчету энергетических характеристик основного оборудования Змиевской ТЭС. – Минэнерго Украины. – 1999.
6. Добротвірська ТЕС. Графіки вихідних нормативних питомих витрат палива устаткування 3-ї черги на суміші кам'яного вугілля та газу. – Міненерго України. – 1999.
7. Михайлов В.В., Поляков М.А. Потребление электрической энергии – надежность и режимы. – М.: Высшая школа, 1989. – 143 с.