

УДК 621. 311

**М. М. Чепурний, к. т. н., доц.; Н. В. Резидент, к. т. н.; І. М. Димніч**  
**ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ ТА**  
**ЕКОНОМІЧНІ РЕЖИМИ ЇХНЬОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ**

*Наведено метод розрахунків і побудови енергетичних характеристик турбогенераторів. Проаналізовано ефективність сумісної роботи енергоблоків, які мають різні теплові характеристики.*

***Ключові слова:** парова турбіна, теплова характеристика, умовне паливо, питома витрата умовного палива, енергоблок.*

### **Вступ**

Основу енергетики складають теплові електричні станції (ТЕС), які використовують органічне паливо. Споживання палива можна зменшити не лише завдяки застосуванню новітніх технологій в енергетиці [1] (активний метод підвищення ефективності), але й завдяки раціональним режимам експлуатації існуючого устаткування (режимний метод). У процесі експлуатації кількох турбогенераторів, які працюють паралельно, завжди виникає завдання, як найефективніше розподілити навантаження між ними. Це завдання розв'язується за допомогою енергетичних характеристик. Енергетичними характеристиками називають залежності питомих витрат пари, теплоти, умовного палива, коефіцієнтів корисної дії від електричних навантажень турбогенератора. Дійсні енергетичні характеристики будують за результатами експлуатаційних випробувань. При цьому треба мати на увазі, що маневрування навантаженням обмежується як максимальною, так і мінімально електричною потужністю устаткування. У процесі експлуатації необхідно боротися за кожну соту процента зменшення витрати теплоти на виробництво одиниці (1 МВт·год) електроенергії. Для того, щоб експлуатаційний персонал міг здійснювати економічні режими, необхідно мати потрібний нормативний матеріал.

Зважаючи на вищевикладене, ставилось завдання на конкретних прикладах проаналізувати сумісну роботу турбогенераторів, які мають різні енергетичні характеристики, та виявити найефективніші режими їхньої роботи.

### **Основні результати**

Для прикладів вибрана конденсаційна парова турбіна К-100-90 з електрогенератором із параметрами пари: початковий тиск 8,8 МПа, початкова температура 530 °С; кінцевий тиск 4 кПа. Максимальна та мінімальна потужності на затисках електрогенератора складають 110 і 30 МВт відповідно. Із [2] вибрано поточні значення витрати пари на турбіну та температур живильної води залежно від електричного навантаження електрогенератора  $N$ , які зведено в табл. 1. Ці дані є основними для обчислень енергетичних характеристик.

Питома витрата пари на турбіну, кг/(кВт·год)

$$d = D / N, \quad (1)$$

де  $N$  має розмірність МВт, а витрата пари  $D$  – т/год.

Питома витрата теплоти, яка витрачається на генерацію пари в парогенераторі для турбоустановок без проміжного перегріву пари, кДж/кг

$$q_{nz} = [(h_0 - h'_{жсв}) + \alpha \cdot (h'_0 - h'_{жсв})], \quad (2)$$

де  $h_0$ ,  $h'_{жсв}$  і  $h'_0$  - ентальпія перегрітої пари, живильної води та продувальної води із барабана парогенератора відповідно;  $\alpha$  – частка безперервної продувки, яка вибирається в межах 0,02 – 0,03.

Питома теплота, яка витрачається на турбогенератор (енергоблок), МДж/(кВт·год)

$$q = d \cdot q_{nz}. \quad (3)$$

Загальна теплова потужність, яка витрачається на турбогенератор (ТГ), МВт

$$Q = D \cdot q_{nz} / 3,6 \cdot 10^{-3}. \quad (4)$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) турбогенератора (брутто)

$$\eta = N / Q = 3,6 / q. \quad (5)$$

Питома витрата умовного палива, кг/(кВт·год)

$$b = 0,123 / \eta. \quad (6)$$

Загальна витрата умовного палива на енергоблок, кг/с

$$B = b_y \cdot 3,6 / N. \quad (7)$$

На підставі наведених формул обчислено поточні значення енергетичних характеристик, які зведено в табл. 1, а графічну інтерпретацію характеристик показано на рис. 1 і рис. 2.

Таблиця 1

Поточні значення енергетичних характеристик

Навантаження електрогенератора, МВт	Показники						
	$D_I$ , т/год	$t_{жсв}$ , °C	$d_I$ , кг/(кВт·год)	$Q_I$ , МВт	$\eta_I$	$b_I$ , кг/(кВт·год)	$B_I$ , кг/с
110	400	225	3,63	280	0,393	0,313	9,563
100	366	220	3,66	260	0,384	0,320	8,91
80	296	207	3,71	220	0,363	0,338	7,532
60	238	191	3,96	180	0,333	0,369	6,156
40	180	175	4,51	140	0,286	0,430	4,78
30	155	166	5,16	120	0,25	0,492	4,12

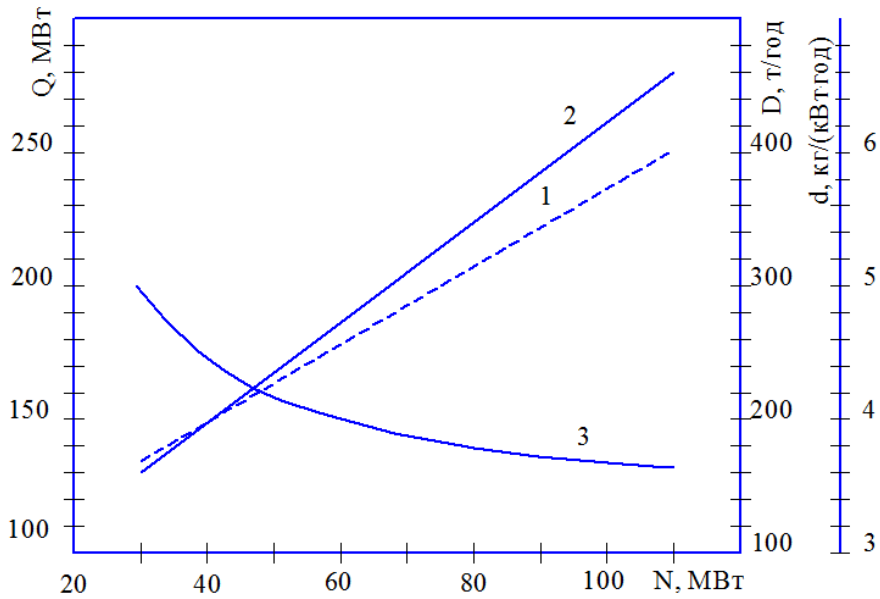


Рис.1. Характеристики турбогенераторів: 1 – витратна характеристика  $D = f(N)$ ; 2 – теплова характеристика  $Q_I = f(N)$ ; 3 – характеристика питомої витрати пари  $d_I = f(N)$

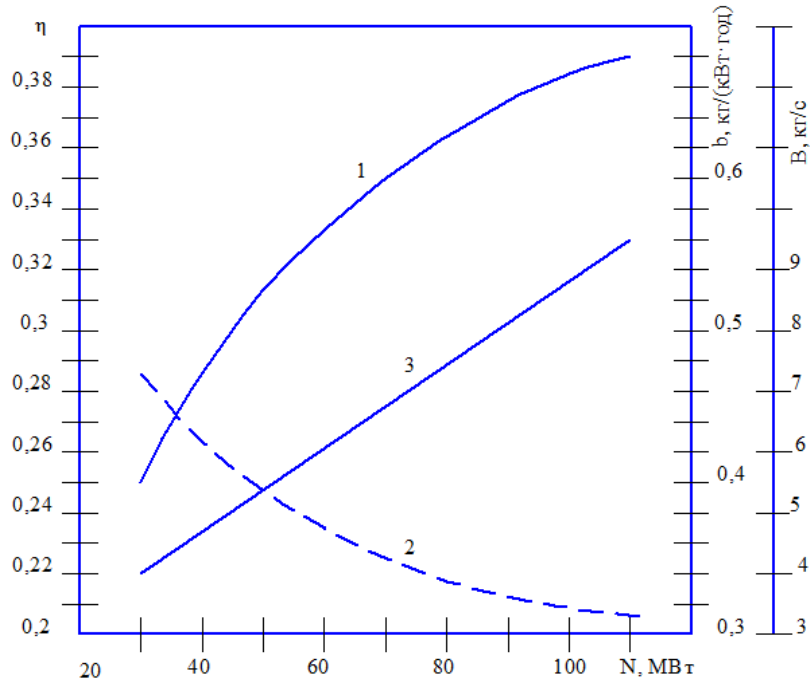


Рис. 2. Характеристики турбогенератора: 1 –  $\eta_I = f(N)$ ; 2 –  $b_I = f(N)$ ; 3 –  $B_I = f(N)$

Із наведених рисунків видно, що теплова  $Q_I = f(N)$  і витратні  $D = f(N)$  і  $B = f(D)$  характеристики – лінійні. Для цього енергоблока їхні рівняння:

$$D_1 = 63,125 + 3,0625 \cdot N; \Delta D / \Delta N = 3,0625 \text{ m}/(\text{MBm} \cdot \text{год}); \quad (8)$$

$$Q_1 = 60 + 2 \cdot N; \Delta Q / \Delta N = 2 \text{ MBm}/\text{MBm}; \quad (9)$$

$$B_1 = 2,05 + 0,0685 \cdot N; \Delta B / \Delta N = 0,0685 \text{ кг}/\text{MBm}. \quad (10)$$

Перший доданок у рівнянні характеристики є величиною, що витрачається на холостий хід турбогенератора, тобто за умови  $N = 0$ . Другі доданки в рівняннях характеристик є Наукові праці ВНТУ, 2012, № 2

відносним приростом величини на одиницю електричної потужності турбогенератора, тобто  $\Delta D/\Delta N$ ,  $\Delta Q/\Delta N$ ,  $\Delta B/\Delta N$ .

Основною (визначальною) характеристикою слід вважати теплову характеристику  $Q = f(N)$  (див. (4) – (7)). Вона являє собою приріст сумарних теплових втрат, оскільки саме сумарні, а не окремі втрати, визначають ефективність роботи ТГ. Відносний приріст сумарних теплових втрат, як побачимо далі, може бути надійним критерієм економічного перерозподілу навантаження між окремими ТГ, які працюють паралельно. Нескладно простежити також ідентичний характер залежностей  $d = f(N)$  та  $b = f_i(N)$ , а також зворотний їм характер змін ККД турбогенератора.

Із практики експлуатації відомо, що навіть однотипні ТГ мають хоч і схожі, але неоднакові характеристики. Нехай другий турбогенератор на ТЕС К-100-90 має теплову характеристику, яка наведена в табл. 2 і на рис. 3.

Таблиця 2

Дані основних характеристик другого турбогенератора

Навантаження електрогенератора $N_2$ , МВт	Показники			
	$Q_2$ , МВт	$\eta_2$	$b_2$ , кг/(кВт·год)	$B_2$ , кг/с
30	133	0,225	0,546	4,555
40	150	0,266	0,462	5,137
60	188	0,319	0,385	6,423
80	225	0,355	0,346	7,687
100	262	0,381	0,322	8,951
110	280	0,393	0,313	9,563

Із порівняння даних, наведених в табл. 1 і табл. 2, видно, що другий турбогенератор К-100-90 працює з більш низьким ККД, ніж перший. Рівняннями лінійних характеристик є:

$$Q = 78 + 1,8375 \cdot N; \Delta Q/\Delta N = 1,8375 \text{ МВт/МВт}; \quad (11)$$

$$B = 2,678 + 0,0626 \cdot N; \Delta B/\Delta N = 0,0626 \text{ кг/МВт}. \quad (12)$$

Порівнюючи (9) і (11), нескладно виявити, що другий енергоблок має менший відносний приріст теплоти.

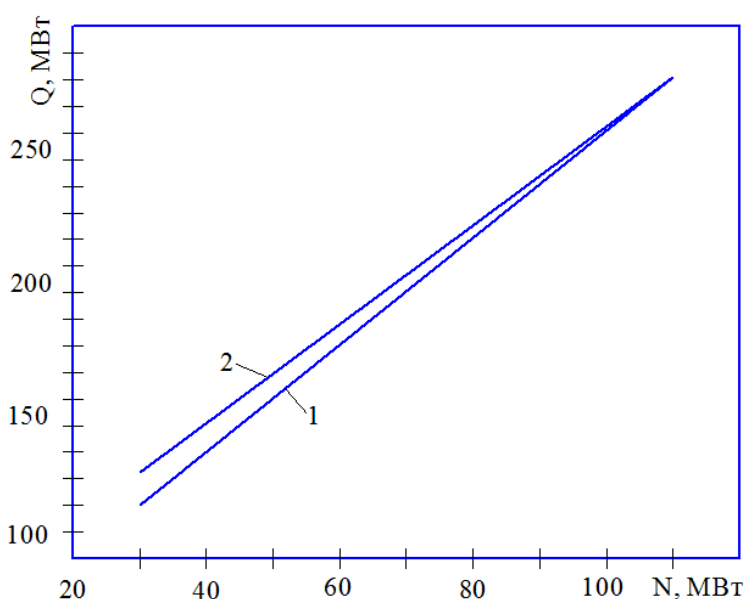


Рис.3 Теплові характеристики першого (1) і другого (2) турбогенераторів

Нехай сумарне навантаження ТЕЦ складає 140 МВт. Здавалось би, цілком логічно на максимальну потужність завантажувати турбогенератор з більшими значеннями ККД. Але спробуємо розвантажувати перший ТГ і довантажувати другий турбогенератор. Основні показники роботи окремих турбогенераторів і ТЕС за цієї умови наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Показники сумісної роботи турбогенераторів на ТЕС

$N_1$ , МВт	$Q_1$ , МВт	$\eta$	$B$ , кг/с	$N_2$ , МВт	$Q_2$ , МВт	$\eta_2$	$B_2$ , кг/с	$N_{ТЕС}$ , МВт	$Q_{ТЕС}$ , МВт	$\eta_{ТЕС}$	$B_{ТЕС}$ , кг/с
110	280	0,393	9,563	30	133	0,225	4,555	140	413	0,339	14,118
100	260	0,384	8,9	40	150	0,266	5,137	140	410	0,341	14,037
80	220	0,363	7,53	60	188	0,319	6,423	140	408	0,343	13,95
60	180	0,333	6,156	80	225	0,355	7,687	140	405	0,346	13,84
40	140	0,286	4,78	100	262	0,3816	8,95	140	402	0,348	13,73
30	120	0,25	4,1	110	280	0,393	9,563	140	400	0,35	13,63

За допомогою даних табл. 3 можна визначити найефективніші режими роботи ТЕС для будь-якого розподілу навантаження між енергоблоками. Наведені дані свідчать про те, що передача навантаження від енергоблока з більшими значеннями ККД до енергоблока з меншими значеннями ККД за певних умов підвищує ефективність роботи ТЕЦ, що наочно проілюстровано на рис. 4.

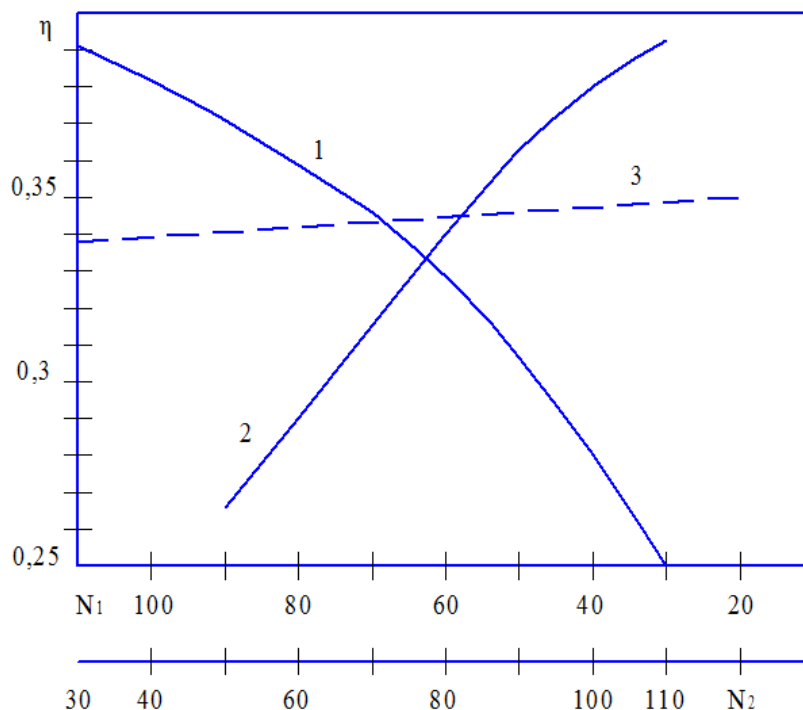


Рис. 4. Значення коефіцієнтів корисної дії: 1 – першого енергоблока; 2 – другого енергоблока; 3 - ТЕС

Це можливо лише тоді, коли теплова характеристика турбогенератора з меншими значеннями ККД має менший відносний приріст теплоти  $\Delta Q/\Delta N$ , тобто менші теплові втрати в процесі виробництва електроенергії. Нескладно помітити, що в режимі роботи ТЕС з  $N_1 = 110$  МВт і  $N_2 = 30$  МВт витрата умовного палива складає 14,118 кг/с, а в режимі роботи ТЕС з  $N_1 = 30$  МВт і  $N_2 = 110$  МВт вона становить 13,63 кг/с. Отже, для  $N_{ТЕС} = 140$  МВт досягається економія умовного палива, що дорівнює 1,756 т/год.

Розглянемо тепер роботу ТЕС за умови, що другий енергоблок має теплову

характеристику, яку зображено на рис. 5, а інші показники характеристик наведено в табл. 4.

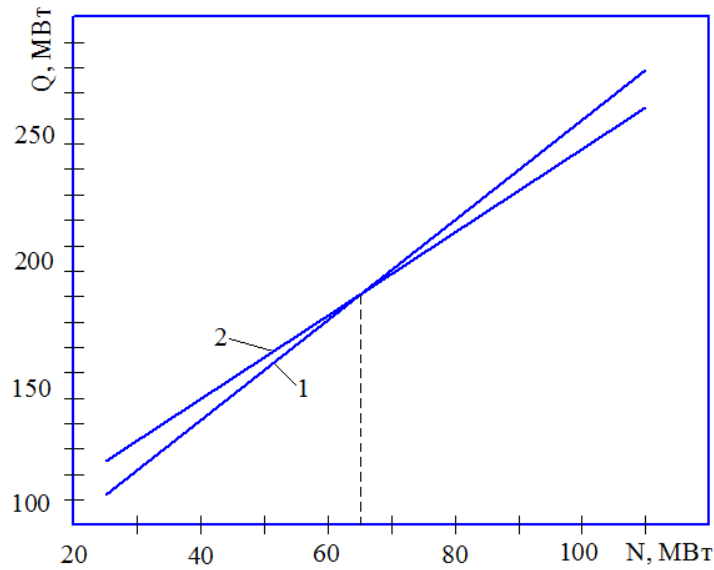


Рис. 5. Теплові характеристики першого (1) і другого (2) турбогенераторів

Із рис. 5 видно, що рівновелика ефективність роботи першого і другого енергоблоків досягається за умови  $N_1 = N_2 = 65$  МВт. При цьому для  $N_2 < 65$  МВт ефективність роботи другого турбогенератора менша, ніж першого, а для  $N_2 > 65$  МВт – навпаки. Рівняння теплової та паливної характеристики другого турбогенератора мають вигляд:

$$Q_2 = 78,57 + 1,714 \cdot N; \Delta Q / \Delta N = 1,714 \text{ МВт} / \text{МВт}; \tag{13}$$

$$B = 2,708 + 0,0583 \cdot N; \Delta B / \Delta N = 0,0583 \text{ кг} / \text{МВт}. \tag{14}$$

Таблиця 4

**Показники основних характеристик другого енергоблока**

Навантаження електрогенератора $N_2$ , МВт	Показники			
	$Q_2$ , МВт	$\eta_2$	$b_2$ , кг/(кВт·год)	$B_2$ , кг/с
30	130	0,23	0,534	4,456
40	150	0,266	0,462	5,137
60	180	0,333	0,369	6,156
65	190	0,342	0,359	6,493
80	215	0,372	0,33	7,347
100	250	0,4	0,307	8,542
110	267	0,412	0,298	9,122

Знову звернемо увагу на те, що й у цьому разі відносний приріст теплоти в другому енергоблоці більший, ніж у першому. Це дозволяє очікувати, що передача навантаження на другий турбогенератор має підвищувати ефективність роботи ТЕС. Показники сумісної роботи енергоблоків на ТЕС зведено в табл. 5.

Показники сумісної роботи турбогенераторів на ТЕС

$N_1$ , МВт	$Q_1$ , МВт	$\eta$	$B$ , кг/с	$N_1$ , МВт	$Q_2$ , МВт	$\eta_2$	$B_2$ , кг/с	$N_{ТЕС}$ , МВт	$Q_{ТЕС}$ , МВт	$\eta_{ТЕС}$	$B_{ТЕС}$ , кг/с
110	280	0,393	9,563	30	130	0,23	4,456	140	410	0,341	14,02
100	260	0,384	8,9	40	150	0,266	5,137	140	410	0,341	14,02
80	220	0,363	7,53	60	180	0,333	6,156	140	400	0,35	13,685
60	180	0,333	6,156	80	215	0,372	7,347	140	395	0,354	13,528
40	140	0,286	4,78	100	250	0,4	8,541	140	390	0,356	13,32
30	120	0,25	4,1	110	267	0,412	9,122	140	387	0,362	13,21

Дані табл. 5 свідчать про те, що до навантаження 65 МВт ефективніше працює перший енергоблок. Це пояснюється тим, що витрати теплоти на холостий хід у нього менші, ніж у другого. Після навантаження 65 МВт ефективніше працює другий енергоблок, оскільки відносний приріст теплоти, у нього менший, ніж в першому. Виходить, що до навантажень 60 МВт доцільно насамперед завантажувати перший енергоблок, а після навантаження 60 МВт – другий. Отже, завантаження другого енергоблока до максимальної потужності зумовлює економію умовного палива –  $\Delta B = 2,916$  т/год.

### Висновки

1. Коефіцієнти корисної дії та пов'язані з ними питомі витрати теплоти не можуть бути критеріями економічного розподілу навантаження між енергоблоками.
2. Теплова характеристика є основною характеристикою, за допомогою якої визначається ефективність роботи теплоенергетичних установок.
3. Критерієм економічного розподілу навантаження між енергоблоками є відносний приріст теплоти на виробництво електроенергії.
4. Для забезпечення економії палива слід повністю завантажувати енергоблоки, які мають менший відносний приріст теплоти.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чепурний М. М. Енергозбережні технології в теплоенергетиці / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. - Вінниця: ВНТУ, 2009. – 114 с.
2. Теплотехнический справочник : [под ред. В. Н. Юренева и П. Д. Лебедева]. – М.: Энергия, 1975. – Т. 1. – 744 с.
3. Рыжкин В. Я. Тепловые электрические станции / В. Я. Рыжкин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 456 с.

**Чепурний Марко Миколайович** - к. т. н., професор кафедри теплоенергетики інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

**Резидент Наталія Володимирівна** - к. т. н., старший викладач інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

**Димніч Ілона Миколаївна** - студентка 5 курсу інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Вінницький національний технічний університет.